

МАССОВАЯ  
**РАДИО**  
БИБЛИОТЕКА

А.Ф. ПЛОНСКИЙ

# КВАРЦЕВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ



ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

1954

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А. И. БЕРГ, И. С. ДЖИГИТ, О. Г. ЕЛИН,  
А. А. КУЛИКОВСКИЙ, А. Д. СМЕРНОВ, Ф. И. ТАРАСОВ,  
Б. Ф. ТРАММ, П. О. ЧЕЧИК и В. И. ШАМШУР.

МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

---

*Выпуск 195*

*А. Ф. ПЛОНСКИЙ*

# *КВАРЦЕВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО

МОСКВА

1954

ЛЕНИНГРАД

*В книге рассматриваются вопросы применения пьезокварцевых резонаторов в радиолюбительской практике. Приводятся краткие сведения о типах кварцевых пластин, конструкциях кварцедержателей и способах настройки резонаторов. Описываются также различные схемы генераторов с кварцевой стабилизацией и кварцевых фильтров. Даются практические соображения по выбору кварцевых пластин, подгонке их частот в любительских условиях, а также по конструированию, налаживанию и экспериментальному исследованию кварцевых генераторов и фильтров.*

*Книга рассчитана на читателей, знакомых с основами общей радиотехники, интересующихся коротковолновой радиосвязью или частотно-измерительной аппаратурой.*

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие радиовещания и радиосвязи поставило перед конструкторами ряд задач по совершенствованию передающей и приемной аппаратуры, повышению надежности и эффективности ее работы. К числу таких задач относится, во-первых, повышение стабильности излучаемых частот и, во-вторых, улучшение избирательных свойств приемной аппаратуры. Решение обеих этих проблем упиралось в необходимость создания новых типов колебательных систем, во много раз более добротных и стабильных, чем обычные контуры, составленные из сосредоточенных индуктивностей и емкостей. Такими колебательными системами явились пьезокварцевые резонаторы, которые в настоящее время находят широкое применение не только в радиосвязи и радиовещании, но и в астрономии, метеорологии и т. д.

Развитие пьезокварцевой техники зиждется на работах советских ученых и инженеров: действительного члена АН СССР А. В. Шубникова, лауреатов Сталинских премий Г. Г. Коваленка, Б. К. Шембея и др. Генераторы с кварцевой стабилизацией были исследованы акад. А. И. Бергом, проф. Д. А. Рожанским, проф. Г. А. Кьяндским и др. Полосовые кварцевые фильтры были изобретены Я. И. Эфрусси еще в 1931 г. Следует отметить, что спустя 3 года после создания кварцевого фильтра в США появилось сообщение об «изобретении» кварцевых фильтров американцем Мэзоном. «Автор» упомянутого «изобретения» полностью скопировал схему, опубликованную Я. И. Эфрусси в 1931 г.

Редактор А. Ф. Сенченков

Техн. редактор И. М. Скворцов

Сдано в набор 5/XI 1953 г.  
Бумага 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>  
Т 01616

Тираж 25 000 экз.  
В печ. листе 44 000 знаков.

Подписано к печати 15/I 1954 г.  
5 п. л. Уч.-изд. л. 5,5  
Цена 2 р. 20 к. Заказ 378

Типография Госэнергоиздата Москва, Шлюзовая наб., 10.

Схема, предложенная Я. И. Эфрусси, не претерпела существенных изменений до наших дней. Она была исследована и получила дальнейшее развитие в работах как самого изобретателя, так и других советских ученых.

Развитие пьезокварцевой техники происходит чрезвычайно интенсивно. Совершенствуются конструкции кварцевых резонаторов, создаются новые схемы генераторов и фильтров, образцовых мер (эталонов) частоты и т. п.

Цель настоящей книги — ознакомление радиолюбителей с основами пьезокварцевой техники и с теми применениями, которые находят кварцевые резонаторы в связной и измерительной аппаратуре.

Автор

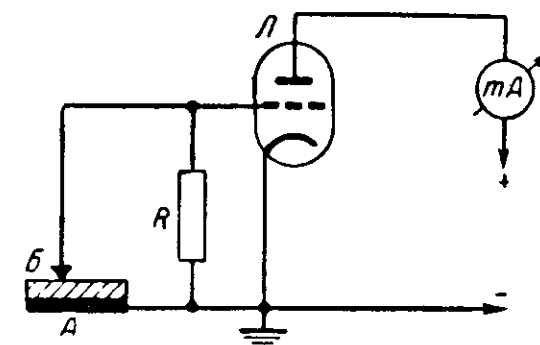
## ГЛАВА ПЕРВАЯ

### КВАРЦЕВЫЙ РЕЗОНАТОР

#### ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

В некоторых кристаллических веществах (кварце, турмалине, сегнетовой соли и др.) наблюдается так называемый пьезоэлектрический эффект, который заключается в том, что механическая сила, приложенная к определенным граням кристалла, вызывает появление электрических зарядов на этих гранях, причем величина заряда пропорциональна приложенной силе, а его знак зависит от характера нагрузки (растяжение или сжатие). Такой пьезоэффект называется прямым. Наблюдается также обратный пьезоэлектрический эффект. Он состоит в том, что электрическая поляризация кристалла сопровождается его деформацией — сжатием или растяжением — в зависимости от знака заряда.

Обнаружить пьезоэлектрический эффект можно с помощью схемы, показанной на фиг. 1. Исследуемый кристалл кладется на плоский металлический электрод  $A$  и прощупывается другим электродом  $B$ , имеющим форму острия. При кратковременном надавливании острием на поверхность кристалла в анодной цепи лампы  $L$  возникает импульс постоянного тока, отклоняющий стрелку миллиамперметра  $mA$ . Если при надавливании на острие (а следовательно, и на сетке лампы) образуется положительный заряд, анодный ток увеличивается, и стрелка миллиамперметра отклоняется



Фиг. 1 Схема прибора для обнаружения пьезоэлектрического эффекта



вправо; отрицательный заряд вызывает уменьшение анодного тока и отклонение стрелки влево.

Таким образом, тела, обладающие пьезоэффектом, (пьезоэлектрики) могут рассматриваться как преобразователи механической энергии в электрическую и наоборот.

Пьезоэлектрики находят применение в электроакустике (пьезоэлектрические звукопередатчики, микрофоны и громкоговорители), в машиностроении (приборы для измерения давлений) и в радиотехнике (электромеханические колебательные системы — резонаторы). Последнее из перечисленных применений пьезоэлектриков и рассматривается в настоящей книге.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЬЕЗОКВАРЦЕ

Пьезоэлектрические пластинки, используемые в качестве электромеханических колебательных систем, изготавливаются преимущественно из кристаллического кварца.

Кварц представляет собой одну из разновидностей кремнезема  $\text{SiO}_2$  и составляет около 12% земной коры. Пьезоэлектрическим эффектом обладает лишь так называемый «низкотемпературный» кварц, встречающийся в природе в виде кристаллов или бесформенной гальки. При нагреве выше  $573^\circ\text{C}$  кварц переходит в «высокотемпературную» разновидность и лишается пьезоэлектрических свойств.

Кварц химически устойчив, он не растворяется ни в одной из кислот, за исключением плавиковой. Твердость кварца составляет 7 единиц десятибалльной шкалы.

## КВАРЦЕВЫЕ РЕЗОНАТОРЫ

Под кварцевым резонатором понимается электромеханическая колебательная система, состоящая из пьезокварцевой пластины, электродов и держателя.

Если кварцевую пластину, вырезанную определенным образом из низкотемпературного кристалла, поместить между металлическими пластинками-электродами, закрепить посредством держателя и приложить к электродам переменную разность потенциалов, то вследствие пьезоэффекта в кварце возбуждятся колебания.

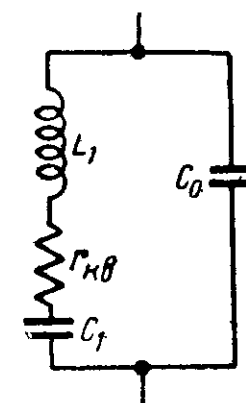
Кварцевая пластина, как и любая механическая колебательная система (маятник, пружина и т. п.), имеет собственную резонансную частоту. Если частота подводимого к пластине переменного напряжения совпадает с ее резо-

нансной частотой, амплитуда колебаний резко возрастает. Сущность механического резонанса в пластине состоит в том, что в ней устанавливаются стоячие упругие волны, причем размер пластины, в направлении которого распространяются колебания, кратен половине длины этих волн. Длина упругой волны при данной частоте колебаний пропорциональна скорости распространения, которая, в свою очередь, определяется упругостью и плотностью кварца. Упругость и плотность кристаллического кварца таковы, что линейные размеры пластин, настроенных на радиочастоты, измеряются в миллиметрах и сантиметрах.

Если воспрепятствовать возникновению колебаний в пластине путем механического зажатия, то она превратится в обычный конденсатор, емкость которого будет определяться площадью электродов, расстоянием между ними и диэлектрической проницаемостью кварца. Этот конденсатор создаст реактивную емкостную проводимость, существующую наряду с проводимостью, обусловленной пьезоэлектрическими свойствами кварца. Величина пьезоэлектрической проводимости для всех частот, за исключением резонансной, очень мала (во много раз меньше емкостной проводимости). При резонансе, когда деформации кварца велики, электрическое сопротивление резонатора резко уменьшается, и величина пьезоэлектрической составляющей тока, проходящего через кварц, возрастает. Таким образом, кварцевый резонатор эквивалентен последовательной колебательной цепи  $L_1 r_{кв} C_1$ , зашунтированной статической емкостью  $C_0$  электродов, кварцедержателя и монтажа. Такая эквивалентная схема кварцевого резонатора представлена на фиг. 2.

Благодаря малым потерям энергии кварцевый резонатор эквивалентен электрическому колебательному контуру с очень большой добротностью. Если добротность обычных контуров не превышает 100—300, то в случае кварцевых резонаторов она достигает 1 000 000.

Высокие механические свойства кварца, его химическая устойчивость и прекрасные изоляционные качества обеспечивают постоянство частоты кварцевых резонаторов и обуславливают их широкое применение в радиотехнике.



Фиг. 2. Эквивалентная схема кварцевого резонатора.

Построим кривую зависимости реактивного сопротивления кварца от частоты. Последовательная (пьезоэлектрическая) ветвь эквивалентной схемы может быть представлена в виде двух последовательно соединенных реактивных сопротивлений разных знаков. Сопротивление индуктивности выражается известной формулой

$$X_{L_1} = \omega L_1,$$

а сопротивление емкости

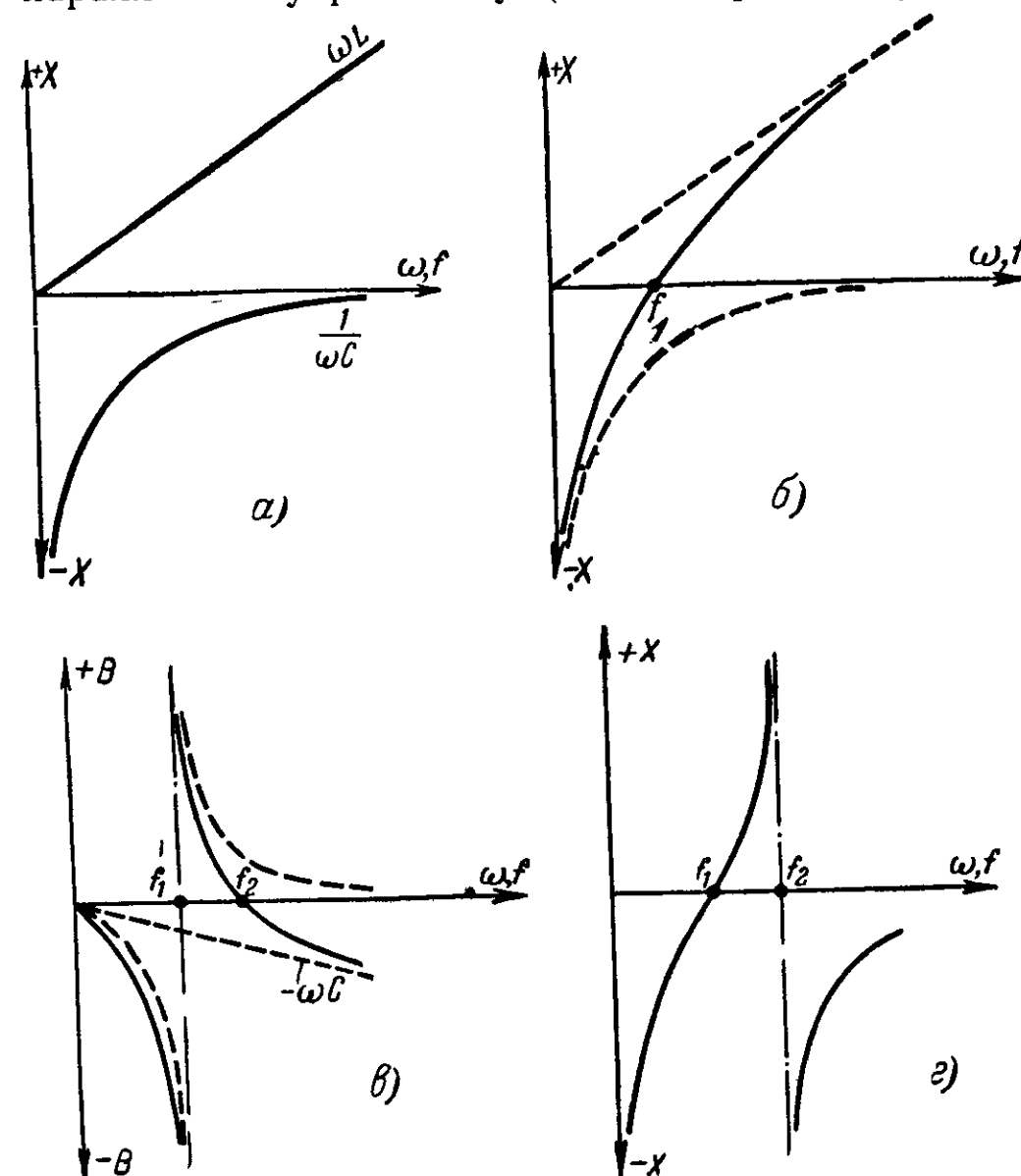
$$X_{C_1} = -\frac{1}{\omega C_1}.$$

Кривые реактивных сопротивлений изображены на фиг. 3,а. На фиг. 3,б произведено графическое сложение этих кривых и получена результирующая кривая реактивного сопротивления последовательного колебательного контура. Эта кривая характеризуется наличием последовательного резонанса  $f_1$ . При частотах ниже  $f_1$  реактивное сопротивление контура носит емкостный характер (отрицательно), а при частотах выше  $f_1$  контур ведет себя как индуктивность, и его реактивное сопротивление положительно.

Построенная кривая не учитывает действия статической емкости. Для того чтобы получить результирующую кривую реактивного сопротивления кварцевого резонатора в целом, нужно произвести графическое сложение сопротивлений обеих его параллельных ветвей. Поскольку эти сопротивления соединены параллельно, а не последовательно, как в предыдущем случае, необходимо построить графики их обратных величин (т. е. проводимостей), сложить их (в результате сложения получается кривая реактивной проводимости кварцевого резонатора) и затем построить обратную кривую, которая и будет характеристикой реактивного сопротивления кварцевого резонатора в целом.

Кривые реактивных проводимостей  $B = \frac{1}{X}$  ветвей эквивалентной схемы кварца показаны на фиг. 3,в. На этой же фигуре приведена результирующая кривая реактивной проводимости кварцевого резонатора. Эта кривая имеет две характерные частоты  $f_1$  и  $f_2$ . При частоте  $f_1$  реактивная проводимость бесконечно велика, а при  $f_2$  — равна нулю, так как в этой точке емкостная и индуктивная проводимости уравновешивают друг друга. Частота  $f_1$  соответствует после-

довательному резонансу кварцевого резонатора, частота  $f_2$  — его параллельному резонансу (или антирезонансу). Частота



Фиг. 3. Графический анализ эквивалентной схемы кварцевого резонатора.

а — кривые реактивных сопротивлений ветвей резонатора, б — графическое сложение кривых реактивных сопротивлений; в — кривые реактивных проводимостей ветвей резонатора и результирующая кривая, г — результирующая характеристика реактивного сопротивления кварцевого резонатора

та последовательного резонанса, определяемая ветвью  $L_1 C_1$ , может быть выражена известной формулой

$$f_1 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_1}}.$$

Частота параллельного резонанса, определяемая параллельным соединением эквивалентной индуктивности  $L_1$  с по-

следовательной цепочкой емкостей  $C_1$  и  $C_0$ , выражается формулой

$$f_2 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 \frac{C_1 C_0}{C_1 + C_0}}}.$$

Отсюда

$$\frac{f_2}{f_1} = \sqrt{1 + \frac{C_1}{C_0}}.$$

Таким образом, соотношение частот параллельного и последовательного резонансов зависит от соотношения динамической и статической емкостей кварца. Величина интервала между резонансами  $\Delta f = f_2 - f_1$  естественно тем больше, чем выше отношение  $\frac{f_2}{f_1}$ . Величина  $\Delta f$  зависит от ряда факторов: типа кварцевой пластины, ее размеров, площади электродов и т. п. Опытным путем было установлено, что максимальный разнос частот последовательного и параллельного резонансов кварцевого резонатора близок к  $0,4\% f_1$ , что соответствует минимальному достижимому на практике соотношению статической и динамической емкостей кварца  $\frac{C_0}{C_1} = 125$ .

На фиг. 3,2 показана результирующая характеристика реактивного сопротивления кварцевого резонатора. Реактивное сопротивление в любой точке кривой определяется как величина, обратная проводимости. Следовательно, при частоте последовательного резонанса  $f_1$  реактивное сопротивление кварца равно нулю, а при частоте параллельного резонанса  $f_2$  бесконечно велико.

При построении кривых мы не учитывали действия активного сопротивления кварца  $r_{кв}$ . Полное сопротивление кварцевого резонатора на частоте последовательного резонанса  $f_1$  равно активному сопротивлению  $r_{кв}$ .

### ВИДЫ КОЛЕБАНИЙ КВАРЦЕВЫХ ПЛАСТИН

Колебания в кварцевых резонаторах классифицируются по типу деформаций и по размерам, определяющим резонансную частоту.

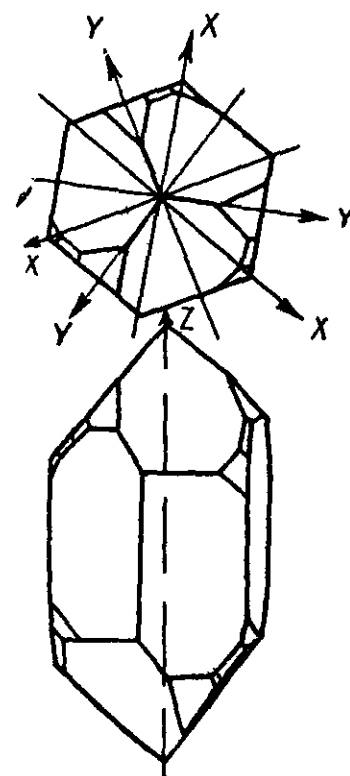
Деформаций могут быть четырех простейших видов: изгиб, сдвиг, кручение, сжатие — растяжение. Встречаются также сложные деформации, например контурные,

На практике виды колебаний обычно классифицируются по размеру пластины, определяющему частоту колебаний, и в зависимости от этого подразделяются на две основные группы: 1) колебания по толщине (называемые иногда поперечными) и 2) колебания по длине или ширине (называемые также продольными). Соответственно и кварцевые резонаторы подразделяются на резонаторы, колеблющиеся по толщине, и резонаторы, колеблющиеся по длине. Колебания по толщине используются на частотах выше 300—400 кГц, а колебания по длине — на более низких частотах. Использование поперечных колебаний на частотах ниже 300 кГц нежелательно, так как на этих частотах размеры пластин, колеблющихся по толщине, чрезмерно велики, и расход сырья становится недопустимо большим. Использование продольных колебаний на частотах выше 400 кГц также нецелесообразно, так как размеры пластин, колеблющихся по длине, на этих частотах слишком малы.

### ТИПЫ СРЕЗОВ КВАРЦЕВЫХ ПЛАСТИН

Пьезоэлектрические явления, происходящие в кварце, удобно рассматривать с помощью системы координатных осей, положение которых относительно решетки кристалла неизменно. Эти оси нанесены на фиг. 4. Заметим, что понятие «ось» в данном случае относится не к одной или нескольким определенным линиям, а к неограниченному числу параллельных направлений, так как в одних и тех же направлениях свойства кристалла совершенно одинаковы.

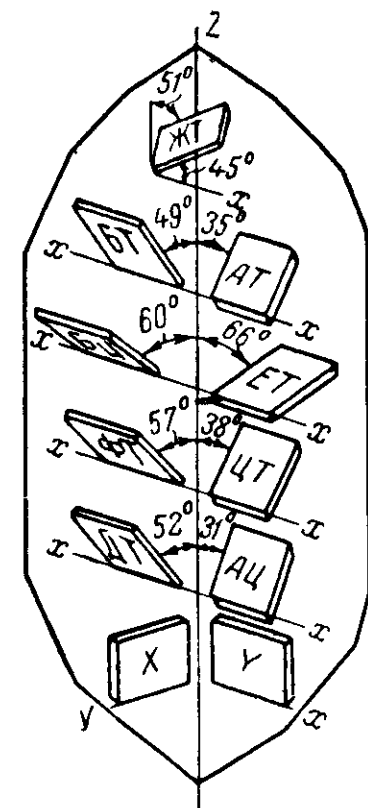
Через вершины кристалла проходит так называемая ось  $Z$  или оптическая ось. Перпендикулярно к ней расположены три оси  $X$  (электрические оси). При сжатии или растяжении кристалла в направлении любой из электрических осей заряды, возбуждаемые вследствие пьезоэффекта, максимальны. На противоположных концах электрической оси возбуждаются разноименные заряды. Перпендикулярно плоскостям  $XZ$  проходят оси  $Y$ , называемые также механическими.



Фиг. 4. Идеальный кристалл кварца.

Кварцевые пластины вырезаются под различными углами по отношению к осям кристалла. В большинстве срезов ширина пластины делается параллельной электрической оси. При этом отсчет угла среза ведется от оптической оси (под углом среза понимается угол между плоскостью пластины и осью Z).

На практике приняты буквенные обозначения срезов: X, Y, AT, BT, DT, CT и т. д. Ориентация некоторых наиболее распространенных срезов относительно кристаллографических осей и решетки кристалла иллюстрируется фиг. 5.



Фиг. 5 Ориентация пластин различных срезов относительно кристалла

Исторически первые кварцевые пластины вырезались перпендикулярно электрической оси (X-срез или «классический» перпендикулярный срез) и колебались *продольно*. Такие пластины имели прямоугольную форму, причем направление длины совпадало с осью Y. Выбор такой ориентации объяснялся тем, что пьезоэлектрический эффект максимален именно в пластинах, вырезанных под углом 90° к оси X. Впоследствии стали использовать также *поперечные* колебания пластин «классического» среза.

Однако резонаторы X-среза обладают существенными недостатками — наличием большого количества паразитных (побочных) резонансов и плохой температурной стабильностью. В настоящее время эти резонаторы применяются сравнительно редко.

Работы по усовершенствованию кварцевых резонаторов завершились созданием так называемых «косых» срезов. Косые срезы более сложны в изготовлении, однако они обладают достоинствами, благодаря которым находят широкое применение.

Среди пластин, колеблющихся по толщине, наиболее распространены резонаторы срезов AT и BT. В случае колебаний по длине применяются резонаторы срезов JT, CT и DT. Перечисленные типы косых срезов отличаются высокой температурной стабильностью и сравнительно малым количеством паразитных резонансов.

## РАСЧЕТ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

Размеры, определяющие частоту колебаний резонаторов, вычисляются по формуле

$$h = \frac{N}{f},$$

где  $h$  — размер, определяющий частоту резонатора (длина, ширина или диаметр при колебаниях по длине; толщина — при поперечных колебаниях), мм;

$N$  — частотный коэффициент;

$f$  — собственная частота резонатора, кГц.

Частотные коэффициенты наиболее употребительных срезов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Срез	Форма пластин	Вид колебаний	Частотный коэффициент, кГц·мм
X	Прямоугольная	Поперечный	2 870
AT	Прямоугольная	Поперечный	1 662
BT	Прямоугольная	Поперечный	2 550
DT	Круглая	Продольный	2 470
DT	Квадратная	Продольный	2 073
DT	Квадратная 45°*	Продольный	2 341
CT	Круглая	Продольный	3 766
CT	Квадратная	Продольный	3 087
CT	Квадратная 45°*	Продольный	3 583
JT	Прямоугольная	Продольный	3 293

\* В квадратных пластинах срезов DT и CT стороны иногда вырезаются под углом 45° к электрической оси

Приведенные в табл. 1 значения частотных коэффициентов являются приближенными и могут в некоторых пределах колебаться при изменении габаритов пластин и отклонениях углов среза. Тем не менее, пользуясь ими, можно с достаточной степенью вероятности установить тип среза пластины (в случае, если известна ее частота) или частоту (при известном угле среза).

## КОНСТРУКЦИИ КВАРЦЕДЕРЖАТЕЛЕЙ

Пластины, колеблющиеся по длине, и пластины, колеблющиеся по толщине, крепятся по-разному. Наиболее старый способ крепления резонаторов, рассчитанных на поперечные колебания, — это зажатие кварцевой пластины меж-



ду металлическими пластинами (электродами). Конструкция кварцедержателя с накладными электродами показана на фиг. 6,а. Подобный способ крепления значительно увеличивает затухание, вносимое в резонатор, и сильно влияет на его частоту. Увеличение эквивалентного активного сопротивления резонатора обуславливается потерями на трение поверхности колеблющегося кварца о металлические электроды.

Попытки уменьшить потери, вносимые креплением, привели к созданию конструкции кварцедержателя с зазором, в которой пластина, не испытывая заметного механического давления, свободно лежит между двумя металлическими пластинами — электродами (фиг. 6,б). Эквивалентная схема резонатора с зазором показана на фиг. 6,в. Емкость  $C_z$  — емкость зазора. Эквивалентная схема такого резонатора может быть приведена к обычной эквивалентной схеме кварца. От величины зазора в некоторой степени зависит частота последовательного резонанса (емкость зазора, подключенная последовательно с эквивалентным контуром кварца, повышает резонансную частоту), поэтому одним из наиболее существенных условий стабильной работы такого резонатора является постоянство величины зазора, равного обычно нескольким десятым долям миллиметра.

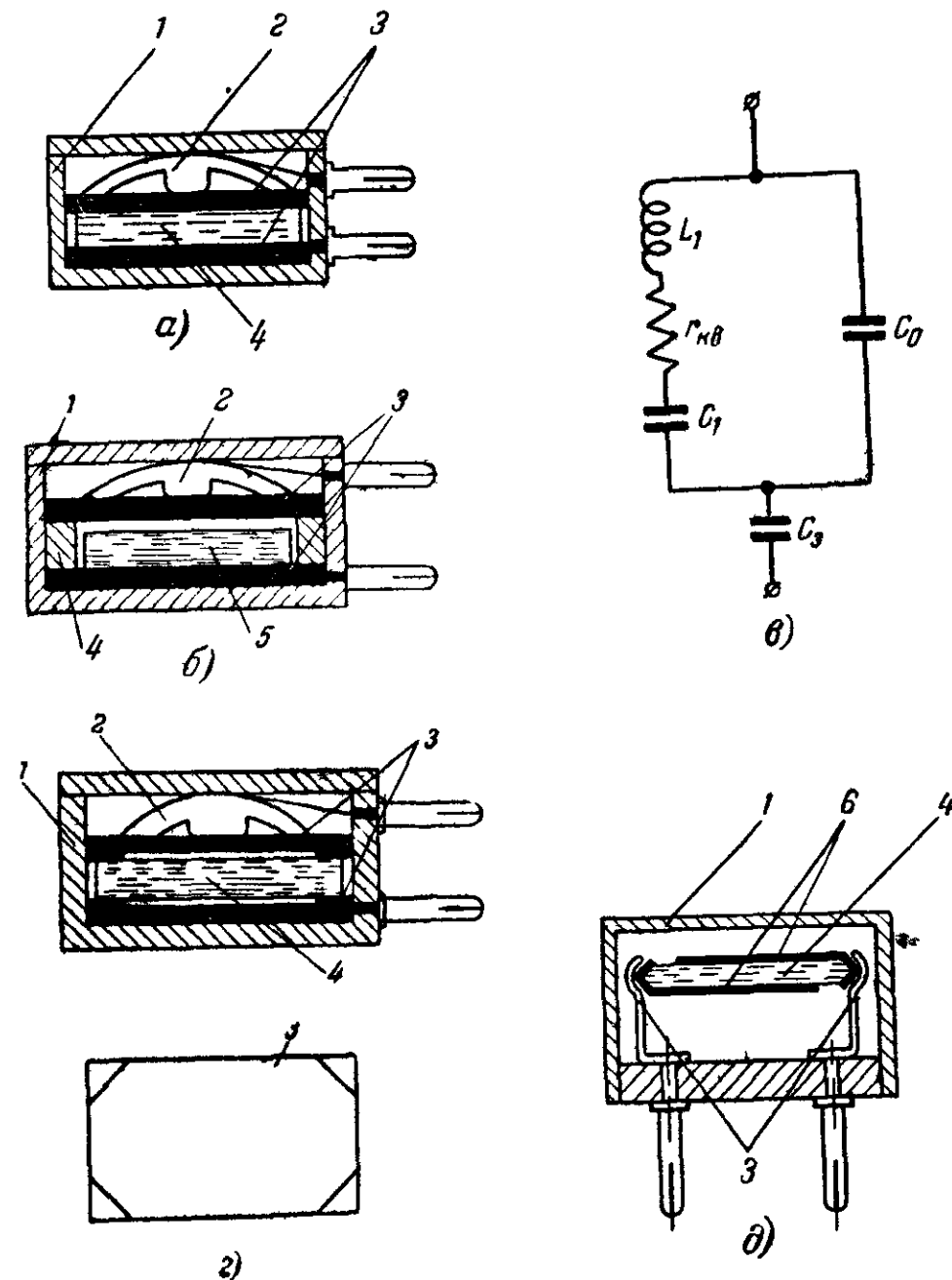
В некоторых конструкциях величину зазора можно регулировать перемещением одного из электродов посредством винта с мелкой резьбой, обеспечивающего параллельность поверхностей электродов.

Недостатком резонатора с зазором является возможность акустического резонанса, который резко понижает добротность пластины. Колеблющийся кварцевый резонатор, как и всякое движущееся тело, испытывает сопротивление со стороны воздуха или иной среды, в которой проходит движение. Колеблющиеся грани пластины излучают воздушные ультразвуковые волны. Если величина зазора составляет целое число акустических полуволн, амплитуда ультразвуковых колебаний в зазоре возрастает, наступает акустический резонанс. В результате возрастают потери энергии, что и ухудшает добротность резонатора. Если постепенно изменять величину зазора, можно обнаружить ряд резких пиков активного сопротивления, соответствующих моментам акустического резонанса.

В кварцевых резонаторах с зазором нередко наблюдается изменение интенсивности колебаний по мере прогрева пластины при ее работе в генераторной схеме. Это явление

объясняется изменением величины зазора вследствие температурных деформаций арматуры держателя.

Существует конструкция кварцедержателя, в которой металлические пластины, служащие электродами, имеют пло-



Фиг. 6. Различные конструкции кварцедержателей для пластин, колеблющихся по толщине.

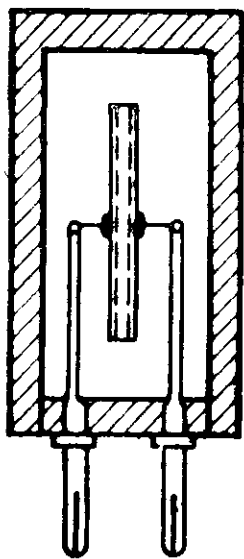
а — с накладными электродами, б — с зазором; в — эквивалентная схема кварцедержателя с зазором, г — кварцедержатель с креплением пластины по углам, д — с зажатием по торцу  
1 — корпус 2 — пружина, 3 — электроды, 4 — кварц, 5 — рамка, 6 — металлическое покрытие

ские выступы по углам для крепления кварца зажатием, в то время как средняя часть электродов сохраняет постоянный зазор с кварцевой пластиной (фиг. 6,г). Кварцедержа-

тели такой конструкции находят применение и в настоящее время главным образом в массовых дешевых установках.

В большей же своей части современные кварцевые резонаторы, как правило, не имеют накладных электродов; функции электродов выполняются металлическим покрытием, нанесенным на поверхность пластины.

Прямоугольные металлизированные кварцы обычно крепятся пружинным зажатием по торцу, отшлифованному наподобие клина. Зажимные пружины служат одновременно проводниками, соединяющими электроды кварца с ножками кварцедержателя. Типовая конструкция кварцедержателя с пружинным зажатием по торцу дана на фиг. 6, д. При правильном подборе длины пластины пружинное зажатие вносит в эквивалентную схему резонатора очень небольшое затухание.



Фиг. 7. Современная конструкция кварцедержателя для продольно колеблющихся пластин.

Металлизированные пластины, предназначенные для поперечных колебаний, иногда изготавливают в виде линз, т. е. круглыми и выпуклыми. Закрепляются они в трех точках по ребру линзы. Электродами, как и в предыдущем случае, служит металлическое покрытие (чаще всего серебряное). Электроды соединяются с ножками или выводами кварцедержателя тонкими проволочками.

Пластины, колеблющиеся продольно, первое время крепились путем игольчатого зажатия в узловых точках колебаний (чаще всего в центре), где пластина не испытывает деформаций. При таком креплении активное сопротивление кварцевого резонатора практически не зависит от давления. В дальнейшем из конструктивных соображений перешли к креплению пластин на бронзовых проволочках, припаяемых к вожженным в кварц (также в узлах колебаний) серебряным точкам. Одна из современных конструкций кварцедержателя для продольно колеблющихся пластин показана на фиг. 7.

#### ВАЖНЕЙШИЕ ПАРАМЕТРЫ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

К числу важнейших факторов, характеризующих качество кварцевого резонатора, относятся его добротность, температурный коэффициент частоты и моностотность.

Как было отмечено в предыдущем параграфе, конструкция кварцевого резонатора во многом определяет величину его добротности. Добротность кварца зависит также от качества обработки пластины. Грубо отшлифованные пластинки вследствие поверхностных потерь обладают гораздо большим эквивалентным сопротивлением по сравнению с полированными или отшлифованными тонким наждаком. Перекос углов пластины, нарушение плоскопараллельности ее граней и прочие технологические дефекты также приводят к резкому понижению добротности.

От добротности пластины зависит качество ее работы: более добротные пластины легче возбуждаются в генераторных схемах, обеспечивают лучшую стабильность частоты генерируемых колебаний, поэтому резонаторы стремятся делать высокодобротными. С этой целью иногда применяют вакуумирование резонаторов, снижающее потери на воздушное излучение и тем самым повышающее добротность.

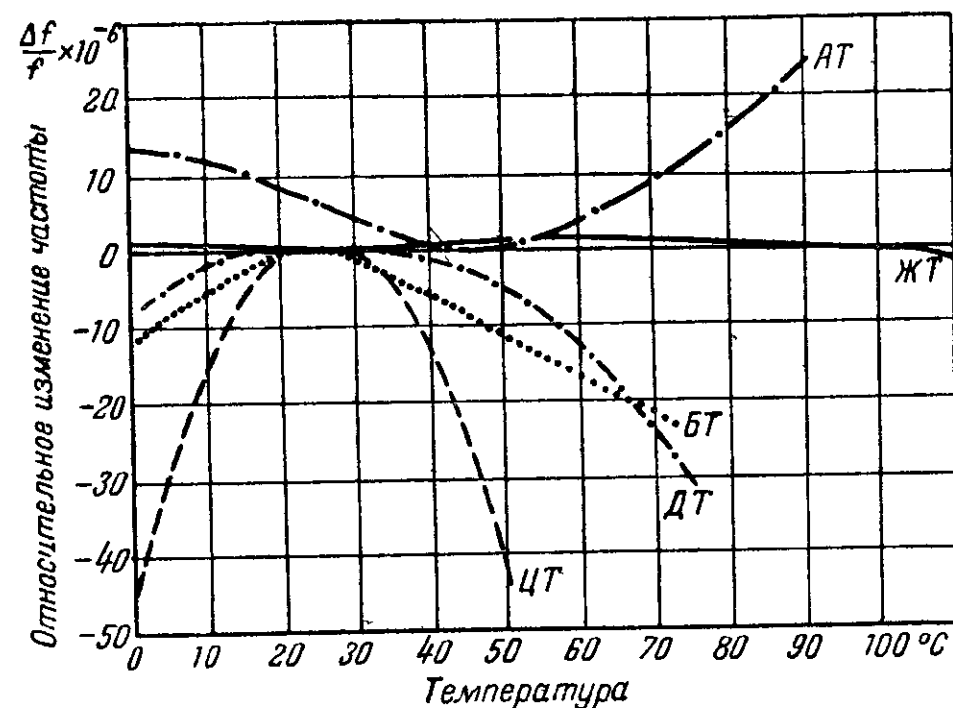
Температурный коэффициент частоты кварцевого резонатора характеризует изменение его резонансной частоты в функции температуры. Численно этот коэффициент показывает величину относительного отклонения частоты кварцевого резонатора при его нагреве или охлаждении на  $1^\circ\text{C}$ . Обычно под этим понимают среднее значение температурного коэффициента в некотором интервале температур. Величина температурного коэффициента частоты зависит от ряда факторов: от угла среза, соотношения сторон пластины, наличия связи между различными видами колебаний в резонаторе, однородности кристалла и т. п.

На фиг. 8 показаны температурные кривые пластин различных срезов. Из этих кривых видно, что минимальным температурным коэффициентом частоты среди срезов, рассчитанных на поперечные колебания, обладает срез  $AT$ , среди продольно колеблющихся — срез  $ЖТ$ . Температурный коэффициент среза  $ЖТ$  зависит от соотношения сторон пластины и минимален при соотношении, равном  $0,857—1,863$ . Частота колебаний резонаторов этого среза определяется размерами меньшей стороны; подгонка температурного коэффициента частоты достигается подшлифовкой большей стороны (длины) пластины.

Весьма существенным показателем качества кварцевого резонатора (особенно при его работе в фильтре) служит моностотность, т. е. отсутствие паразитных резонансов в частотном спектре пластины. Абсолютно моностотных

пластин не бывает и, говоря о моночастотности, обычно подразумевают моночастотность в каком-либо заданном интервале частот по обе стороны от основного резонанса.

Между моночастотностью, добротностью и температурным коэффициентом частоты существует тесная связь. Пластины с ярко выраженными паразитными резонансами, как



Фиг. 8 Температурные кривые пластин различных срезов.

правило, имеют большой температурный коэффициент частоты и меняющуюся с изменением температуры добротность.

Резонаторы «классического» среза Х, так же как пластины Y-среза, в отношении моночастотности (равно как и температурного коэффициента частоты) неудовлетворительны. Пластины срезов АТ, БТ, ДТ и ЦТ обладают удовлетворительной моночастотностью. В резонаторах ЖТ-среза паразитный резонанс определяется большей стороной, и его частота на 16% ниже частоты основного резонанса. В пластинах этого среза иногда наблюдается перескок частоты генерируемых колебаний с основного резонанса на паразитный. Такое же явление наблюдается в пластинах других срезов, если эти пластины имеют ярко выраженные побочные резонансы вблизи основной частоты. Такие пластинки называют многоволнистыми.

В некоторых случаях удается устранить многоволнистость. В пластинах срезов АТ и БТ (при частотах до 1 мГц) моночастотность достигается подбором ширины пластины. По мере уменьшения ширины кварца спектр паразитных резонансов как бы перемещается со стороны более низких частот в сторону более высоких. Паразитные резонансы располагаются группами с интервалами в несколько десятков килогерц. Следует учитывать, что при подшлифовке ширины пластины несколько изменяется ее резонансная частота. Моночастотность проверяется путем просмотра резонансной кривой однокристалльного фильтра (гл. 3), в схему которого входит испытуемый резонатор.

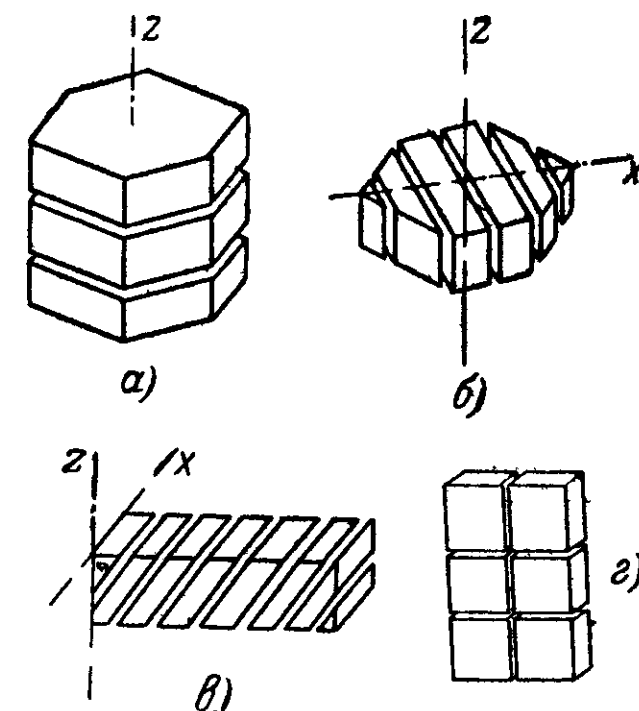
Для улучшения моночастотности пластин, колеблющихся по толщине, их иногда изготавливают в виде линз. С этой же целью прибегают к неполному покрытию пластин электродами специальной формы.

#### КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЬЕЗОКВАРЦЕВОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Кварцевые кристаллы, поступающие в производство, распиливаются на блоки, секции, пласти и заготовки. Последовательность обработки кварцевого сырья иллюстрируется фиг. 9. Распиловка чаще всего производится алмазными пилами, имеющими вид дисков с насечками вдоль кромки. В насечки запрессовывается алмазная крошка, которая и делает кромку диска режущей.

Установка необходимого угла среза осуществляется с помощью специальных оптических и рентгеноскопических приборов.

Заготовки кварцевых пластин шлифуются на металлических шлифовальных кругах, приводимых во вращение электродвигателями. На шлифовальный круг наносится смоченный водой наждачный порошок. Тол-



Фиг. 9 Последовательность обработки кварцевого сырья  
а — блоки б — секции в — пласти, г — заготовки

щина и плоскопараллельность заготовок проверяются с помощью микрометров.

Частота пластины измеряется посредством гетеродинного волномера или образцовой меры (эталоны) частоты. Для этого пластину промывают спиртом, просушивают, вставляют в простейший кварцедержатель и «запускают» в генераторной схеме.

После предварительной подгонки частоты пластину подвергают металлизации; окончательная настройка поперечно колеблющихся пластин производится путем изменения толщины металлического покрытия. Продольно колеблющиеся пластины настраиваются подшлифовкой соответствующей стороны или подгонкой толщины покрытия.

### НАСТРОЙКА КВАРЦЕВЫХ ПЛАСТИН В ЛЮБИТЕЛЬСКИХ УСЛОВИЯХ

В радиолюбительской практике нередко возникает потребность в перестройке кварцевого резонатора с одной частоты на другую. Настройка пластин в домашних условиях — дело довольно трудное, но все же возможное. Перестройка резонаторов может производиться только в сторону повышения частоты. Пластины, настроенные на частоту, например, 2 мГц можно переточить на частоту 3 мГц, обратная же операция невозможна, так как мы можем только уменьшать размеры кварца, а для понижения частоты необходимо их увеличение.

Перестройка частоты продольно колеблющихся пластин проще, чем пластин, колеблющихся по толщине. Она сводится к уменьшению длины, ширины или диаметра пластины. Зная, что частота обратно пропорциональна соответствующему размеру пластины, нетрудно подсчитать ориентировочную величину размера, соответствующую новому, желательному значению частоты. Укорачивать пластину следует поровну с обоих концов, иначе крепежная проволока окажется не в центре и будет вносить большое затухание. Небольшое укорочение пластины осуществляется путем шлифовки наждаком. Наждак разводится в воде так, чтобы образовалась каша, по густоте напоминающая сметану. Слой наждака наносится на кусок матового стекла или плоскую пластину металла. Размеры шлифуемой пластины измеряются штангенциркулем, перпендикулярность сторон контролируется угольником. Если требуется значительно укоротить пластину, излишек ее длины можно отрезать ал-

мазом (при условии, что пластина не слишком толста). Когда длина пластины приблизится к расчетной величине, необходимо проверить частоту резонатора (способы измерения и измерительная аппаратура описаны в гл. 4). Чем ближе частота кварца к требуемой величине, тем чаще производятся измерения и тем осторожнее ведется шлифовка. Следует помнить, что излишнее укорочение пластины приводит к непоправимому браку. Всякий раз перед установкой резонатора в схему необходимо тщательно промыть его в спирте и протереть чистой тряпочкой.

Незначительно понизить частоту продольно колеблющейся пластины удастся путем закругления (сошлифовки) одного из ее уголков.

Незначительно повысить частоту металлизированного кварца с колебаниями по толщине можно лишь путем частичного снятия серебряного покрытия. Металлический слой постепенно стирается чернильной резинкой, кисточкой из стеклянной ваты или зубным порошком, нанесенным на кусок фетра. Время от времени пластина ополаскивается в воде, протирается спиртом, вставляется в кварцедержатель, после чего производится замер, и в случае надобности операция повторяется вновь. При этом следует соблюдать осторожность, так как частота, которая вначале была ниже требуемой, легко может превысить ее. С другой стороны, слишком большое снятие серебра может привести к тому, что в покрытии появятся просветы, и пластина окажется испорченной.

Незначительно понизить частоту металлизированного кварца можно с помощью мягкого графитового карандаша. Слой графита, наносимый на металлическое покрытие, как бы увеличивает его толщину, что и приводит к понижению частоты. Следует отметить, что этот способ является суррогатным и допустим только в любительских условиях. Обычно же толщину покрытия увеличивают гальванической металлизацией.

Стирая или наращивая металлическое покрытие, можно изменять частоту резонатора всего лишь на несколько сотых или, самое большее, десятых долей процента. Более значительное повышение частоты поперечно колеблющейся пластины требует снятия металлического слоя и соответствующего уменьшения толщины кварца. Поскольку в любительских условиях обратное нанесение покрытия после шлифов-

ки невозможно, приходится применять металлические накладные электроды с зажатием по плоскости.

Сошлифовка толщины пластины в любительских условиях ведется следующим образом:

1. Снимается металлическое покрытие. Проще всего это делается с помощью азотной кислоты. В крайнем случае серебряный слой можно стереть зубным порошком.

2. Одна из граней пластинки смачивается водой и притирается к плоскопараллельной колодке из стекла или металла (плоскопараллельность колодки выверяется микрометром).

3. Плоский кусок стекла или металлическая плита смачивается наждаком. Последний не должен быть слишком грубым (его зерна не должны оставлять на поверхности царапин, различимых невооруженным глазом). В процессе шлифовки водят поверхностью шлифуемой пластины по смоченной наждаком плите. Давление на пластину должно быть равномерно распределено по всей ее плоскости. Время от времени толщина пластины (вместе с плоскопараллельной колодкой) измеряется микрометром. Приспособления для шлифовки показаны на фиг. 10.

4. По достижении заданного размера пластина снимается с колодки, промывается в воде и спирте, просушивается, вставляется в кварцедержатель (последний нетрудно изготовить в любительских условиях) и «запускается» в генераторной схеме для проверки частоты колебаний. Пластина должна быть строго плоскопараллельной<sup>1</sup>, иначе она может не возбуждаться.

5. Точная настройка пластины производится путем подшлифовки ее поверхности тонким наждачным порошком («стодвадцатиминутником»).

<sup>1</sup> Допускается выпуклость в несколько микрон

Незначительное повышение частоты пластины достигается также снятием фаски на одном из ее ребер.

Несколько понизить частоту пластины удастся вышлифовкой канавки на одной из ее боковых граней.

Следует особо подчеркнуть необходимость соблюдения строжайшей чистоты при обращении с кварцем. Нередко пластина перестает возбуждаться только от того, что ее касались недостаточно чистыми руками. Резонатор должен быть предохранен от загрязнения и запыления. Все его детали перед сборкой необходимо промывать в спирте.

## ГЛАВА ВТОРАЯ

### ГЕНЕРАТОРЫ С КВАРЦЕВОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ

#### РЕЖИМЫ РАБОТЫ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Как мы уже отмечали, кварцевая пластина в генераторе выполняет функции колебательной системы, поэтому нет принципиальной разницы между кварцевым генератором и генератором с обычным колебательным контуром.

Существуют два режима работы генераторов с кварцевой стабилизацией: 1) осцилляторный режим и 2) режим затягивания.

При работе в осцилляторном режиме кварцевый резонатор служит основной, первичной колебательной системой генератора, и при его выключении из схемы генерация прекращается.

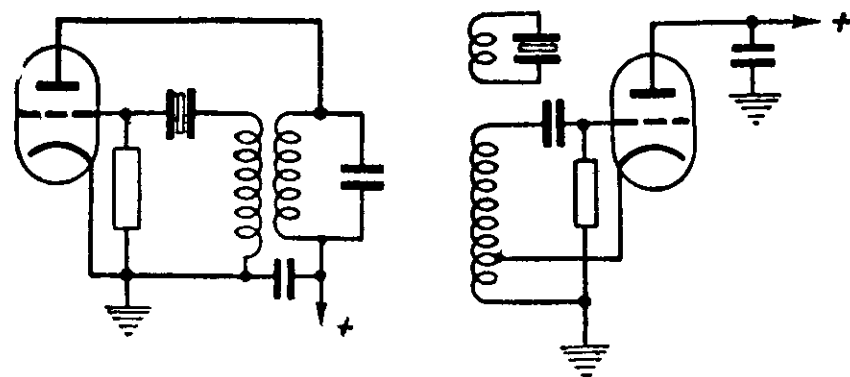
При работе в режиме затягивания кварцевый резонатор входит в колебательную систему как вторичный контур, электрически связанный с основным, первичным контуром генератора. В некоторых вариантах режима затягивания кварц сам является элементом связи, однако он непосредственно не участвует в процессе самовозбуждения колебаний, и генерация может существовать независимо от того, возбуждается пластина или нет.

Для работы в режиме затягивания может быть использован любой генератор с самовозбуждением. Первичный контур такого генератора тем или иным способом связывается с контуром кварца. Примеры схем затягивания приведены на фиг. 11.

Если частота кварцевого резонатора значительно отличается от частоты первичного контура, схема генерирует как

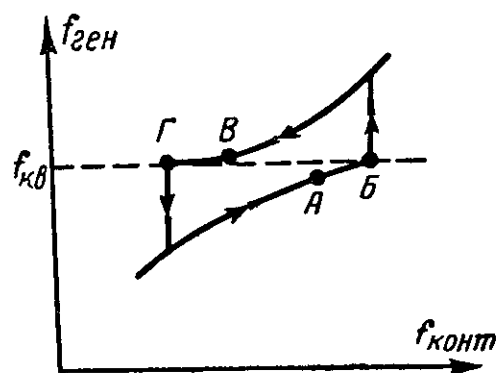


обычный генератор с самовозбуждением. При достаточной близости собственной частоты первичного контура генератора к резонансной частоте кварца наблюдается явление затягивания, и схема генерирует на частоте кварца. На фиг. 12 показана характерная кривая зависимости генерируемой частоты от настройки первичного контура, получившая название «петли затягивания».



Фиг. 11 Схемы кварцевых генераторов, работающих в режиме затягивания.

руемой частоты от настройки первичного контура, получившая название «петли затягивания». Как видно из этой кривой, на некоторых ее участках (А—Б и В—Г) частота генерации определяется в основном частотой кварцевого резонатора и почти не зависит от настройки первичного контура.



Фиг. 12 «Петля затягивания».

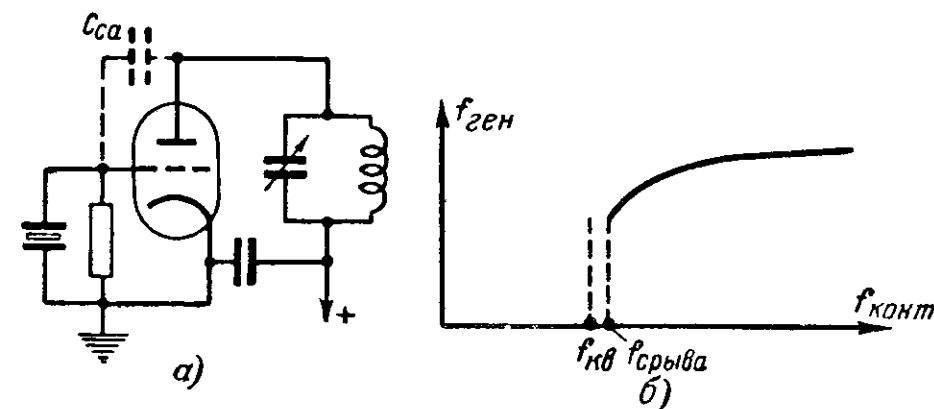
Кварцевые генераторы по схемам затягивания в настоящее время употребляются редко, что объясняется главным образом противоречием между условиями наибольшей стабильности генерируемой частоты и условиями максимальной устойчивости генерации в этом режиме. Действительно, наибольшая стабильность частоты генерации соответствует пологим участкам петли затягивания, которые находятся в непосредственной близости с точками скачка частоты. Работа на этих участках очень неустойчива; при малейшем изменении режима работы генератора возможен перескок генерируемой частоты с одной ветви петли затягивания на другую. Во избежание скачков частоты приходится выбирать рабочую точку на более крутом участке петли затягивания, а это снижает стабильность частоты генератора.

Некоторым достоинством схем затягивания, имеющим значение в любительских условиях, является возможность получения большей, по сравнению с осцилляторным режимом, мощности и использования кварцев с пониженной добротностью, плохо возбуждающихся или вообще не возбуждающихся в осцилляторных схемах.

## МЕХАНИЗМ РАБОТЫ ОСЦИЛЛЯТОРНЫХ СХЕМ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

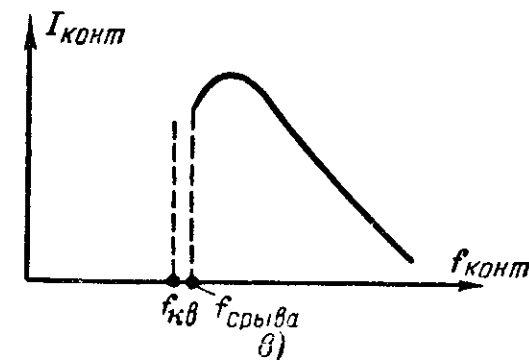
Причины возникновения и условия существования колебаний в кварцевом генераторе можно объяснить на примере простейшей осцилляторной схемы с включением кварца между сеткой и катодом лампы (фиг. 13,а).

Как было указано ранее, кварцевый резонатор может быть заменен эквивалентным колебательным контуром, по-



Фиг. 13 Осцилляторная схема кварцевого генератора с включением кварца между сеткой и катодом лампы.

а — принципиальная схема  
б — кривая зависимости частоты генерируемых колебаний от настройки контура, в — кривая тока в контуре



этому генератор по схеме фиг. 13,а идентичен обычному генератору с двумя колебательными контурами, один из которых включен в анодную цепь лампы, а другой в ее сеточную цепь. В этом генераторе обратная связь осуществляется через междуэлектродную емкость анод—сетка.

Нетрудно заметить, что замена кварцевого резонатора эквивалентным колебательным контуром позволяет преобра-

зовать любую осцилляторную схему в схему с обычными колебательными контурами. Отсюда следует, что к кварцевым генераторам полностью применима теория самовозбуждения и установления колебаний, справедливая для генераторов с обычными колебательными контурами. В таких генераторах (если их параметры удовлетворяют условиям самовозбуждения) колебания возникают самопроизвольно под воздействием случайных флуктуаций тока в цепях генератора. Колебания нарастают по амплитуде до тех пор, пока приток энергии в колебательную систему генератора от источников его питания не уравнивается потерями энергии в ней. Такой баланс энергии наступает в ламповых генераторах при определенной амплитуде колебаний за счет нелинейности анодного или сеточного тока лампы.

Совершенно аналогично протекают процессы возникновения и установления колебаний и в кварцевых генераторах.

Частота колебаний, генерируемых рассматриваемой схемой, близка к антирезонансной частоте, так как в данной схеме кварцевый резонатор действует подобно параллельному колебательному контуру.

Величина эквивалентной индуктивности кварцевого резонатора  $L_1$  измеряется единицами и десятками генри, она во много раз больше эффективной индуктивности других элементов схемы, пересчитанной в эквивалентный контур резонатора. Величина эквивалентной емкости кварца  $C_1$ , измеряемая сотыми и тысячными долями пикофарады, наоборот, во много раз меньше эффективной емкости этих элементов. Эффективные индуктивность и емкость элементов схемы, будучи пересчитаны в эквивалентный контур резонатора, оказываются включенными последовательно с его эквивалентными реактивными элементами  $L_1$ ,  $C_1$  и в силу указанных соотношений оказывают на них весьма незначительное влияние. В этом и заключается одна из причин, обуславливающих высокую стабильность частоты генераторов с кварцевой стабилизацией.

### СТАБИЛЬНОСТЬ ЧАСТОТЫ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Перейдем к рассмотрению вопросов стабильности частоты генераторов с кварцевой стабилизацией. Отклонение частоты кварцевого генератора от номинала определяется, во-первых, точностью ее первоначальной установки на номинал и, во-вторых, уходом, обусловленным влиянием дестабилизирующих факторов. Величина ухода частоты характе-

ризует стабильность частоты генератора или, точнее, ее не-стабильность, которую выражают либо в абсолютных значениях ухода частоты  $\Delta f$ , либо в виде относительных величин  $\frac{\Delta f}{f}$ . Относительную нестабильность нередко выражают в процентах.

Рассмотрим влияние дестабилизирующих факторов на частоту генератора. К числу дестабилизирующих факторов относятся: изменения питающих напряжений, отклонения параметров ламп в процессе эксплуатации или при смене, изменения нагрузки, влияния температуры, влажности и атмосферного давления. При конструировании генераторов стараются создать такие условия их работы, при которых влияния дестабилизирующих факторов вызывают наименьшие изменения частоты, а также стремятся свести эти влияния к минимуму.

Советским ученым принадлежит приоритет в области стабилизации частоты. Лауреаты Сталинских премий доктор техн. наук Б. К. Шембель и проф. М. С. Нейман в своих работах анализировали влияние различного рода факторов на стабильность частоты генераторов и выработали методы стабилизации.

Следует различать два вида стабильности.

1. Стабильность частоты генератора по отношению к собственной частоте его колебательной системы. Стабильность такого рода тем выше, чем добротнее колебательная система генератора.

2. Стабильность собственной частоты колебательной системы относительно какого-либо номинала (эталонной, абсолютно неизменной частоты). Этот вид стабильности определяется устойчивостью параметров колебательной системы по отношению к влияниям различных внешних факторов (температуры, влажности, атмосферного давления, паразитных емкостей или индуктивностей). Важным показателем подобного рода стабильности служит температурный коэффициент частоты.

Таким образом, уход частоты генератора складывается из двух составляющих: из отклонения генерируемой частоты относительно резонансной частоты первичной колебательной системы и из отклонения резонансной частоты относительно заданного номинала, с которым она в начале совпадала.

Для того чтобы суммарный уход частоты генератора был минимален, его колебательная система должна удовлетворять следующим двум требованиям: 1) ее добротность должна быть велика и 2) ее резонансная частота не должна заметно изменяться со временем или под воздействием каких-либо внешних факторов. Последнее условие нередко именуют «эталонностью» колебательной системы.

Как мы уже отмечали, кварцевые резонаторы превосходят все остальные виды колебательных систем как по добротности, так и по эталонности. Тем не менее, при конструировании кварцевых генераторов необходимо предпринимать ряд мер по снижению влияний дестабилизирующих факторов. Об этих мерах будет сказано ниже.

### АКТИВНОСТЬ КВАРЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА ПРИ ЕГО РАБОТЕ В ГЕНЕРАТОРНЫХ СХЕМАХ

Одной из важных характеристик резонатора, предназначенного для работы в генераторных схемах, служит его активность или интенсивность колебаний. Активность — условная характеристика; математического определения она не имеет. Об активности кварца судят по величине сеточного тока генераторной лампы или по глубине спада анодного тока при включении пластины в схему (сказанное относится к случаю осцилляторного режима). Чем резонатор активнее, тем больше сеточный ток и тем сильнее спад анодного тока в момент включения генератора.

Активность пропорциональна добротности кварца, но она зависит не только от свойств самого резонатора, но и от характера колебательной цепи и режима работы генераторной лампы. Поэтому в различных схемах одна и та же пластина может иметь различную активность.

В большинстве простых кварцевых генераторов, не имеющих автоматических регулировок амплитуды колебаний, напряжение высокой частоты на электродах пластины приблизительно пропорционально ее активности. Если генератор работает в недонапряженном режиме, то кварцы, различные по добротности, будут развивать разные напряжения высокой частоты. Однако при работе в перенапряженном режиме пластины, резко отличающиеся друг от друга по добротности, могут развивать приблизительно одинаковые напряжения, хотя и в этом случае более высокое напряжение даст кварц с высокой добротностью.

На практике бывают случаи, когда кварцевая пластина разрушается из-за чрезмерно высокой амплитуды колебаний и связанных с ней деформаций при включении в схему, рассчитанную на применение кварцев с малой активностью. Поэтому необходимо контролировать амплитуду колебаний, что проще всего делать, измеряя колебательный ток, текущий через кварц. Для пластин, колеблющихся по толщине, максимальная допустимая плотность тока, текущего через резонатор, равна  $20 \text{ ма}$  на  $1 \text{ см}^2$  площади пластины, а для резонаторов с колебаниями по длине —  $10 \text{ ма/см}^2$ .

На практике для контроля колебательного тока, текущего через кварц, используются разного рода индикаторы. В качестве простейшего индикатора можно применять лампочку накаливания ( $1 \text{ в}$ ,  $0,075 \text{ а}$ ), которая включается последовательно с кварцем. Сопротивление индикатора должно быть мало, в противном случае ухудшится активность кварцевого резонатора.

### ПРАКТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРОВ С КВАРЦЕВОЙ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ

Имеется большое число схем кварцевых генераторов. Среди них наибольший интерес представляют осцилляторные схемы. На фиг. 13,а показана распространенная схема кварцевого генератора с включением кварца между катодом и сеткой. Как уже упоминалось, генерация в этой схеме происходит вблизи частоты параллельного резонанса и обратная связь осуществляется через емкость между анодом и сеткой генераторной лампы. Эта емкость состоит из междуэлектродной емкости анод—сетка и емкости монтажа, поэтому суммарная емкость обычно оказывается достаточно большой, и условия самовозбуждения выполняются. На низких частотах эту емкость приходится искусственно увеличивать, так как с понижением частоты емкостная проводимость уменьшается. Увеличивать емкость анод—сетка приходится также в тех случаях, когда в качестве генераторной лампы применяется пентод или тетрод. Обычно оказывается достаточно подключить параллельно промежутку анод—сетка дополнительный конденсатор емкостью порядка  $2—10 \text{ пф}$ , чтобы вызвать генерацию.

В рассматриваемой схеме генерация возможна только в том случае, если анодный контур настроен на частоту, более высокую, чем собственная частота кварца, т. е. тогда,

когда цепь анода имеет индуктивную реакцию на частоте генерируемых колебаний. При изменении настройки анодного контура в сторону дальнейшего повышения частоты частота генерации также несколько повышается, что является несомненным недостатком схемы.

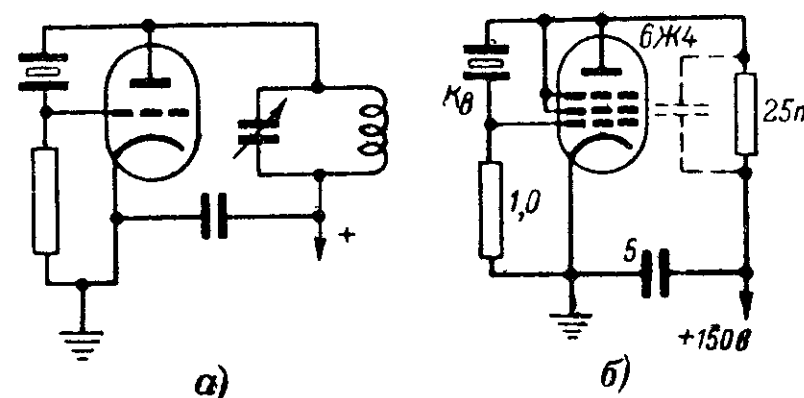
На фиг. 13,б показана кривая зависимости частоты генерируемых колебаний от настройки анодного контура, а на фиг. 13,в дана кривая изменения колебательного тока в анодном контуре при его расстройке. Обе кривые получены экспериментальным путем. Наибольшая интенсивность колебаний соответствует частоте контура, близкой к собственной частоте кварцевого резонатора и граничащей с точкой срыва колебаний. На этой частоте устойчивость генерации низка и при изменении режима работы генераторной лампы возможен срыв колебаний.

Стабильность частоты генерации также зависит от настройки анодного контура. Чем ближе собственная частота этого контура к частоте кварца, тем большее влияние оказывает на генерируемую частоту изменение его настройки. Для того чтобы повысить устойчивость и стабильность частоты генерируемых колебаний, приходится расстраивать анодный контур, разумеется, в сторону повышения его частоты. С расстройкой контура уменьшается его эквивалентное сопротивление, вследствие чего высокочастотное напряжение на нем падает, и полезная мощность генератора понижается. С этим приходится мириться при желании получить выйрыш в стабильности. Величина расстройки ограничивается, с одной стороны, начальной емкостью переменного конденсатора анодного контура, а с другой стороны, требованиями, накладываемыми условиями самовозбуждения. Чем выше активность пластины, тем большую, при прочих равных условиях, расстройку можно допустить. В целях упрощения схемы контур в цепи анода нередко заменяют индуктивностью (дросселем).

В простых одноламповых передатчиках с кварцевой стабилизацией, применяемых начинающими любителями-коротковолновиками, вопросы повышения стабильности отходят на второй план. В таких передатчиках желательно, чтобы полезная мощность была не менее 5 вт. Для повышения отдачи анодный контур делают достаточно высокочастотным и рабочую точку выбирают вблизи частоты срыва колебаний. Повысить интенсивность генерации можно также, включая высокочастотный дроссель последовательно с сопротив-

лением утечки (а иногда и вообще вместо нее). Дроссель, включенный последовательно с сопротивлением утечки, снижает потери высокочастотной энергии в сеточной цепи. На практике индуктивность сеточного дросселя выбирают приблизительно равной 2 мГн. Следует заметить, что при некотором определенном значении индуктивности, зависящем от частоты и прочих условий, может возникнуть паразитная генерация.

Стремиться к повышению мощности свыше 5 вт в указанной схеме не следует, так как это повлечет за собой перегрузку пластины, а иногда и ее разрушение. Кварцевый



Фиг. 14. Осцилляторные схемы кварцевых генераторов с включением кварца между анодом и сеткой лампы.

а — с настроенным контуром, б — с активным сопротивлением в анодной цепи

резонатор, работающий в тяжелых условиях, не сможет обеспечить высокой стабильности частоты генерируемых колебаний. Он будет нагреваться колебательным током, и вследствие нагрева частота резонатора изменится (это особенно заметно в случае большого температурного коэффициента частоты). При манипуляции передатчика резонатор будет периодически нагреваться и остывать, что скажется на тоне телеграфных сигналов.

Схема кварцевого генератора с включением кварца между катодом и сеткой генераторной лампы является в историческом отношении одной из первых схем генераторов с кварцевой стабилизацией. Возможно именно поэтому она получила большое распространение в практике.

На фиг. 14,а показана вторая «классическая» схема, в которой резонатор включается между анодом и сеткой лампы. Эта схема значительно менее распространена, что объяс-

няется главным образом большей нагрузкой кварцевого резонатора при включении между анодом и сеткой.

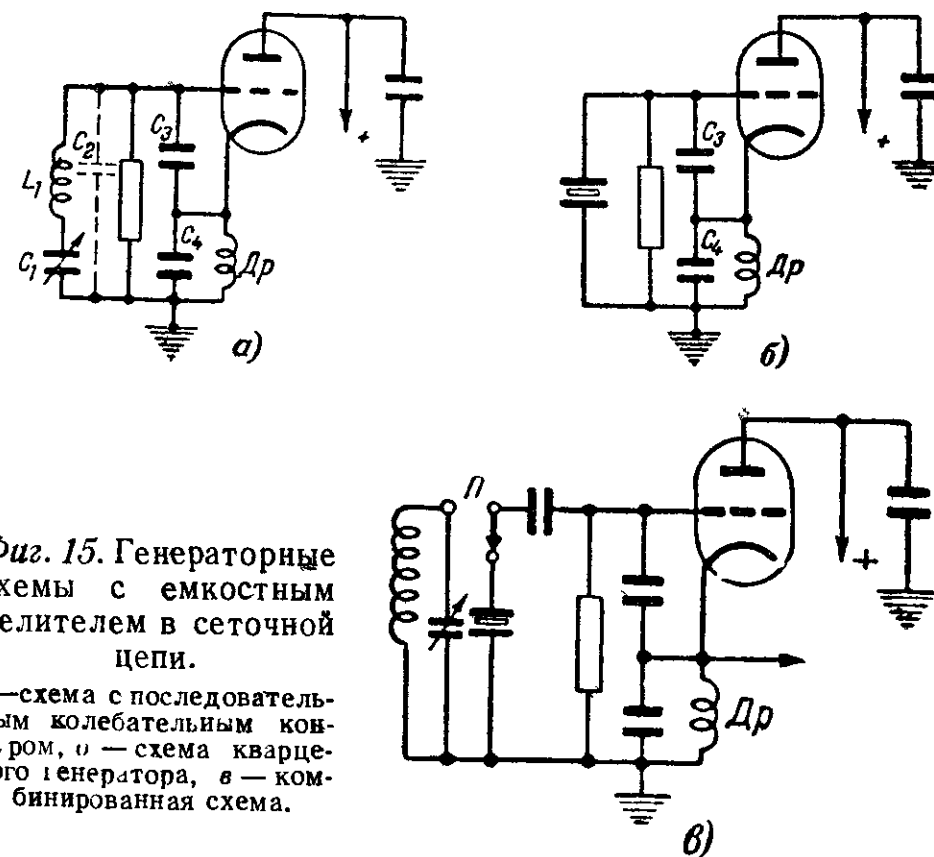
Обратная связь в данной схеме осуществляется через емкость сетка — катод. Колебательный контур должен быть настроен на частоту, более низкую, чем резонансная частота кварца, т. е. он должен иметь емкостную реакцию при частоте генерируемых колебаний. Последняя близка к параллельному резонансу пластины.

В смысле стабильности рассматриваемая схема аналогична генератору с включением кварца между сеткой и катодом. Так же как и в том случае, влияние настройки анодного контура на частоту генерируемых колебаний возрастает по мере приближения к резонансу, поэтому для повышения стабильности также рекомендуется значительно расстраивать анодный контур генератора. Поскольку контур в аноде лампы должен иметь емкостную реакцию, его можно заменить конденсатором малой емкости (5—10 пф). Такая замена целесообразна в том случае, когда от генератора требуется повышенная стабильность. При этом мощность, отдаваемая генератором, значительно уменьшается.

Заслуживает интереса схема, показанная на фиг. 14,б. В этой схеме контур в цепи анода заменен обычным сопротивлением. Принципиально подобная схема не отличается от предыдущей, поскольку анодной нагрузкой для токов высокой частоты служит в ней емкость между анодом и катодом генераторной лампы. Для облегчения генерации параллельно сопротивлению в анодной и сеточной цепях иногда подключают конденсаторы малой емкости. Такая схема отличается довольно высокой стабильностью частоты и может быть рекомендована для использования в качестве задающего генератора в многоламповых высокостабильных передатчиках. К положительным свойствам этой схемы относятся также ее широкодиапазонность, т. е. способность генерировать в широких пределах частот кварцевых резонаторов без какой-либо подстройки элементов генератора. Такое свойство схемы позволяет использовать ее при подгонке или перестройке частот кварцевых пластин. В этом генераторе одинаково хорошо (при условии одинаковой добротности) генерируют кварцы с частотами от 600 кГц до 20 мГц.

Рассмотрим еще одну широкодиапазонную схему кварцевого генератора. В ее основу положена известная схема с емкостным делителем и последовательным контуром в сеточной цепи (фиг. 15,а). Схема такого контура вместе

с емкостью  $C_2$  (в которую входят суммарная емкость делителя  $C_3—C_4$  и емкость монтажа) аналогична эквивалентной схеме кварцевого резонатора. Если контур  $L_1C_1$  заменить кварцем (фиг. 15,б), то при соответствующем подборе емкостей делителя схема будет генерировать, и частота генерации установится в интервале между последовательным и параллельным резонансами кварца. Следует вообще отметить, что в кварцевых генераторах частота колебаний, как пра-



Фиг. 15. Генераторные схемы с емкостным делителем в сеточной цепи.

а — схема с последовательным колебательным контуром, б — схема кварцевого генератора, в — комбинированная схема.

вило, отличается от той, которая указана на этикетке кварца. В различных схемах частота одного и того же резонатора будет различна, причем разница, обусловленная влиянием элементов схемы (в данном случае емкостью делителя и монтажа) может достигать на частоте 7 мГц до нескольких килогерц. Это обстоятельство следует учитывать при точной градуировке по кварцу какого-либо прибора, приемника или возбuditеля с плавной настройкой.

Величины конденсаторов делителя подбираются опытным путем и могут в некоторых пределах отклоняться в ту или другую сторону. Ориентировочно емкость  $C_3 = 100$  пф и  $C_4 = 200$  пф. В качестве дросселя может использоваться любая катушка с индуктивностью от 0,5 до 10 мГн. Экспериментальным подбором параметров генератора можно до-



биться устойчивой работы схемы с кварцами на частоты от 40 кГц до 8 мГц.

Дроссель  $Dp$  в цепи катода не является элементом настройки и в некоторых случаях может быть заменен активным сопротивлением.

Схема фиг. 15,б обладает достаточно высокой стабильностью, что объясняется слабой связью эквивалентного контура кварца с лампой. В любительской практике удобно пользоваться видоизмененной схемой, позволяющей производить чрезвычайно простой и удобный переход с кварцевой стабилизации на параметрическую путем переключения сетки лампы с кварца на обычный контур с плавной настройкой (фиг. 15,в). Напряжение высокой частоты на последующие ступени может сниматься с катода генераторной лампы.

Перейдем к рассмотрению схем кварцевых генераторов с электронной связью, принцип действия которых был впервые предложен в 1933 г. советским ученым Б. К. Шембелем. Такие схемы иногда называют «тритетными» (от слов триод—тетрод). В схемах с электронной связью в качестве генераторных ламп используются тетроды и пентоды.

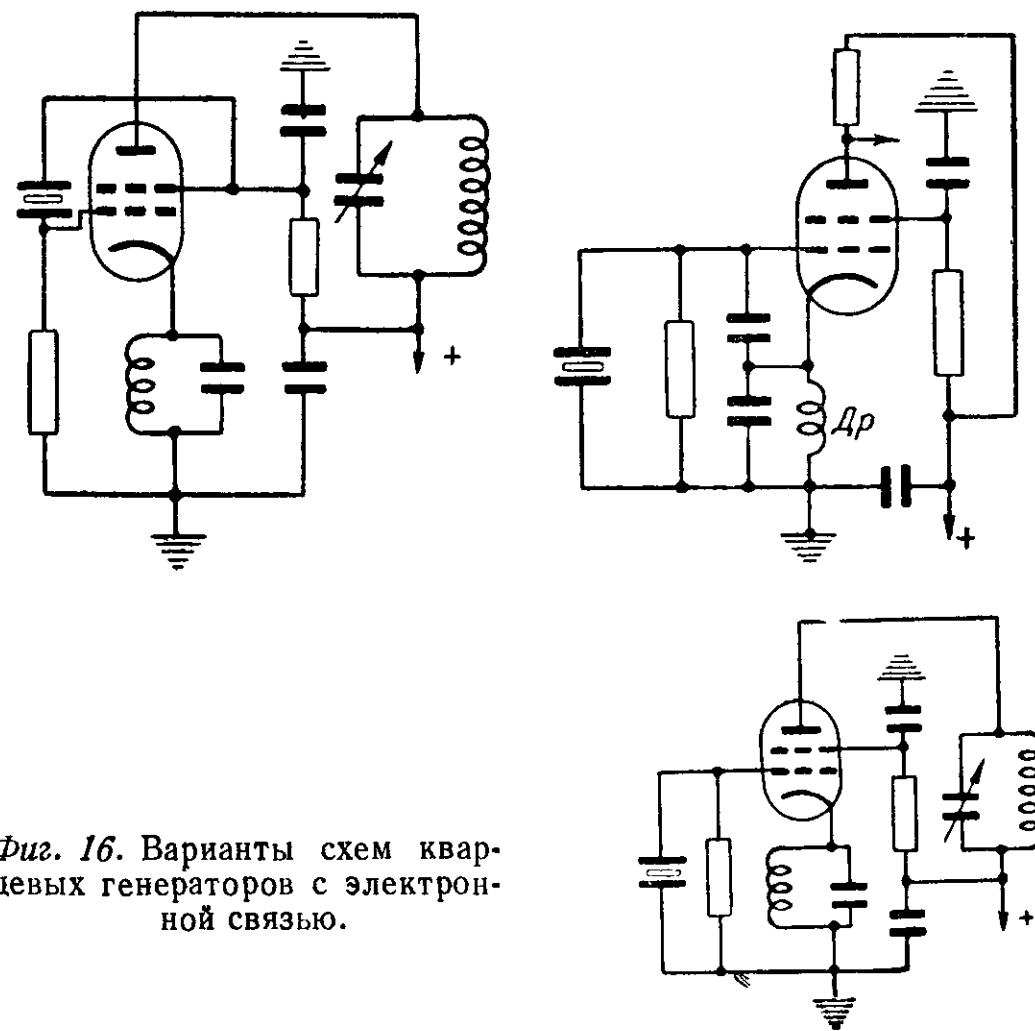
В схеме генератора с электронной связью экранная сетка лампы выполняет функции анода, в то время как анод лампы является как бы анодом усилительной ступени, связанной с генератором общим электронным потоком. Таким образом, в схемах с электронной связью одна лампа выполняет функции двух: генераторной и усилительной. Контур, включенный в анод лампы, непосредственно в процессе самовозбуждения не участвует и может настраиваться как на резонансную частоту кварца, так и на ее гармоники.

В тритетных схемах влияние нагрузки на генерируемую частоту значительно ниже, чем в простых схемах, рассмотренных выше. Однако очевидно, что аналогичный, если не лучший, результат можно получить путем введения в схему генератора (передатчика) специальной разделительной (буферной) ступени на отдельной лампе.

Достоинством тритетных схем, помимо сокращения числа ламп, является и то обстоятельство, что они обеспечивают большую, по сравнению с простыми кварцевыми генераторами, мощность при одинаковой нагрузке на кварц. Так если в обычных одноламповых схемах полезная мощность, как мы отмечали, не должна превышать 5 Вт, то в тритетных

при нормальной нагрузке кварца она может быть увеличена до 20—30 Вт.

В генераторах с электронной связью колебательная мощность распределяется между контурами в цепи экранной сетки и в аноде лампы до некоторой степени пропорционально их эквивалентным резонансным сопротивлениям, поэтому эквивалентное сопротивление анодной нагрузки, в которой



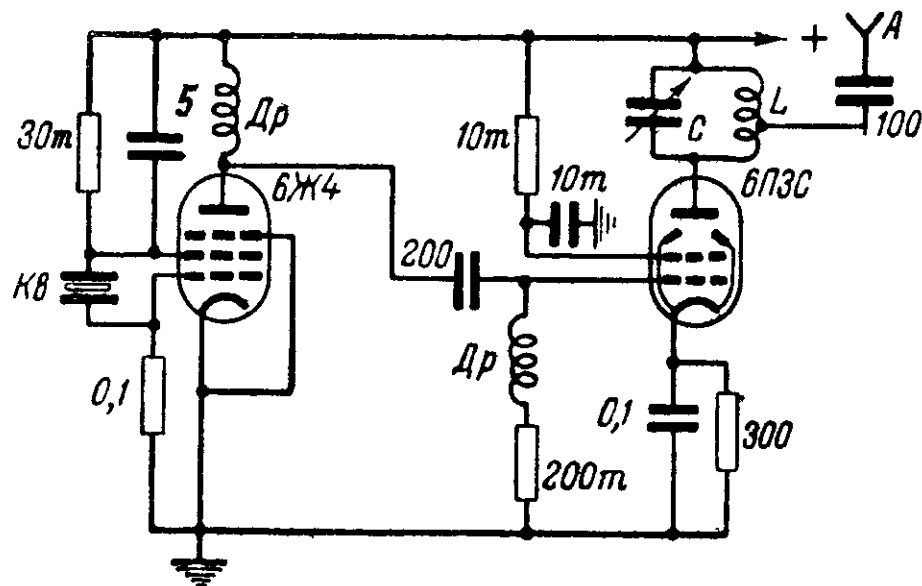
Фиг. 16. Варианты схем кварцевых генераторов с электронной связью.

выделяется полезная мощность, должно в несколько раз превышать сопротивление контура в цепи экранной сетки. Практически последний расстраивают относительно резонансной частоты (разумеется, в соответствующую выбранной схеме сторону) до тех пор, пока мощность, выделяемая в анодном контуре, не начнет уменьшаться. Подобная мера также способствует повышению стабильности частоты генерируемых колебаний.

На фиг. 16 показано несколько вариантов схем кварцевых генераторов с электронной связью.

На фиг. 17 представлена практическая схема передатчика с кварцевой стабилизацией, которая может быть ис-

пользована коротковолновиками второй и третьей категорий. Передатчик собран на двух лампах. Первая из них — пентод 6Ж4 — выполняет функции генераторной. В генераторе используется схема с электронной связью. Кварцевый резонатор включается между управляющей и экранной сетками (последняя играет роль анода генератора). В аноде лампы 6Ж4 имеется высокочастотный дроссель  $D_r$  индуктивностью порядка 2 мкн. Связь с усилительной ступенью



Фиг 17 Практическая схема передатчика с кварцевой стабилизацией.

емкостная. Усилитель мощности собран на лампе 6ПЗС. Используемая схема задающего генератора богата гармониками, поэтому передатчик отдает приблизительно одинаковую мощность как в режиме усиления, так и при удвоении частоты кварца. Например, в любительском диапазоне 7 мггц передатчик может работать с кварцами на 3,5 и 7 мггц, при работе на 14 мггц пригодны кварцы с частотами 7 и 14 мггц и т. д. При переходе с диапазона на диапазон перестраивается лишь один контур  $LC$ , включенный в анодную цепь усилительной лампы. Достоинство данной схемы состоит в ее чрезвычайной простоте и удобстве эксплуатации.

## КВАРЦЕВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ С ПЛАВНОЙ НАСТРОЙКОЙ

Существенный недостаток обычных генераторов с кварцевой стабилизацией заключается в том, что генерируемые ими частоты фиксированы и не могут плавно изменяться.

Между тем, одним из основных требований, предъявляемых к современной радиопередающей аппаратуре, предназначенной для целей связи, является требование, предусматривающее возможность плавного изменения частоты передатчика в пределах заданного диапазона частот. В практике любительской коротковолновой радиосвязи оба корреспондента, как правило, работают на одной частоте. При желании вступить в связь коротковолновик настраивает свой передатчик на частоту той или иной станции и вызывает ее на этой частоте. Ширина любительского диапазона составляет 200 кГц и более, поэтому для того, чтобы «перекрыть» весь этот диапазон, необходимо иметь весьма большое число кварцев (минимум сорок).

В настоящее время разработаны и находят применение схемы кварцевых генераторов с плавным диапазоном частот. Эти схемы можно подразделить на две основные группы: 1) генераторы с уводом частоты кварца и 2) схемы со смещением частот высокочастотного кварцевого генератора и низкочастотного гетеродина с параметрической стабилизацией.

Мы уже отмечали, что в различных генераторных схемах при одном и том же кварцевом резонаторе генерируются разные частоты, что объясняется влиянием реактивных элементов схемы. Это явление может быть использовано для изменения в небольших пределах частоты генератора с кварцевой стабилизацией.

Подключение реактивных элементов к резонатору вызывает смещение его параллельного или последовательного резонансов. Возможны четыре варианта: 1) последовательное соединение кварца и емкости, 2) параллельное их соединение, 3) подключение индуктивности последовательно с кварцем и 4) параллельное соединение кварца с индуктивностью.

При подключении емкости последовательно с резонатором частота последовательного резонанса цепи повышается, приближаясь к частоте параллельного резонанса кварца, которая остается неизменной.

При параллельном подключении емкости понижается частота параллельного резонанса, что так же, как и в предыдущем случае, сужает интервал между резонансами.

Введение индуктивности последовательно с кварцем расширяет интервал между частотами параллельного и последовательного резонансов цепи за счет понижения последней.

Параллельное присоединение индуктивности повышает частоту параллельного резонанса, также расширяя промежутки между резонансами.

Указанные зависимости могут быть получены графическим способом, теми же приемами, какими мы исследовали характеристику реактивного сопротивления кварцевого резонатора.

Рассмотренные в предыдущем параграфе генераторные схемы работают вблизи параллельного резонанса пластины, поэтому их частота определяется частотой параллельного резонанса и почти не зависит от частоты последовательного. Таким образом, изменение генерируемой частоты в этих схемах может осуществляться с помощью переменной емкости или индуктивности, подключенной параллельно кварцу. С увеличением емкости частота генератора будет понижаться, пока не произойдет срыва колебаний. Предел изменения частоты в этом случае, естественно, ограничивается величиной интервала между резонансами и не превышает 0,4% от собственной частоты кварца.

Параллельное подключение переменной индуктивности обеспечивает больший «увод» частоты кварцевого генератора. Пределы изменения последней в данном случае зависят от добротности катушки, подключенной к резонатору. Чем выше добротность индуктивного элемента, тем больше максимальный увод частоты. Относительное изменение генерируемой частоты с помощью переменной индуктивности достигает 0,8%.

Хорошие результаты дает применение колебательного контура, который настраивается на частоту, несколько превышающую частоту кварца, приобретая при этом индуктивную реакцию. Изменяя с помощью конденсатора переменной емкости настройку контура, можно в значительных пределах менять величину его эквивалентной индуктивности.

К недостаткам «индуктивной» регулировки частоты кварцевого генератора относится возможность паразитного самовозбуждения. Кроме того, по мере увода частоты падает ее стабильность.

«Емкостная» регулировка, наоборот, не только не понижает стабильности, но и способствует ее повышению, так как с увеличением статической емкости кварца уменьшается влияние паразитных емкостей (главным образом входной емкости лампы) на частоту колебаний.

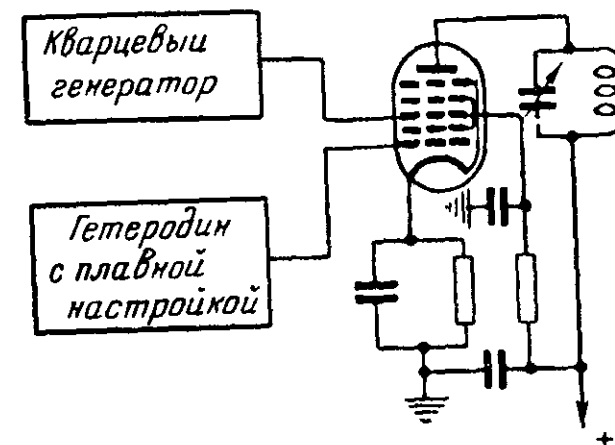
Подстройка частоты кварцевого генератора с помощью реактивных элементов позволяет значительно сократить число кварцев, потребное для полного перекрытия любительского диапазона

Второй способ кварцевой стабилизации в плавном диапазоне частот был предложен советским ученым проф. Г. А. Зейтленок в 1932 г. Этот способ заключается в следующем. Допустим, что на сетки смесительной лампы даны колебания от генератора с кварцевой стабилизацией и от обычного генератора с параметрической стабилизацией и плавной настройкой (фиг 18). Тогда в нагрузке смесительной лампы появятся колебания комбинационных частот и в том числе суммарная и разностная частоты

$$f_1 = f + F$$

и

$$f_2 = f - F.$$



Предположим далее, что частота кварцевого генератора  $f = 5\,000$  кГц, а частота  $F$  генератора

Фиг 18 Простейшая схема кварцевой стабилизации в плавном диапазоне частот

с плавным диапазоном может меняться в пределах от 5 до 50 кГц. Тогда суммарная частота будет меняться от 5 005 до 5 050 кГц. Нестабильность частоты кварцевого генератора среднего класса имеет порядок 0,0001%, а нестабильность частоты генератора с плавной настройкой — порядок 0,01%. Очевидно, наибольшая нестабильность суммарной частоты будет соответствовать тому случаю, когда частоты обоих генераторов как кварцевого, так и с плавной настройкой, изменяются в одну и ту же сторону, т. е. уходы частоты складываются.

$$\Delta f_1 = \Delta f + \Delta F,$$

где  $\Delta f_1$  — уход суммарной частоты;

$\Delta f$  — уход частоты генератора с кварцевой стабилизацией;

$\Delta F$  — уход частоты генератора с плавной настройкой.

Максимальное значение  $\Delta F$  получается при наивысшей частоте  $F = 50 \text{ кГц}$ . Зная нестабильности частот генераторов, нетрудно определить величины уходов:

$$\Delta f = 0,0001\% \cdot f = 5 \text{ гц},$$

$$\Delta F = 0,01\% \cdot F = 5 \text{ гц}.$$

Таким образом, абсолютные уходы частот обоих генераторов одинаковы. Суммарный уход частоты, который получается при изменении частот в одну сторону,  $\Delta f_1 = 10 \text{ гц}$ .

Подсчитаем нестабильность суммарной частоты генератора:

$$\frac{\Delta f_1}{f_1} = \frac{10}{5,05 \cdot 10^6} \approx 0,0002\%.$$

Как видим, стабильность суммарной частоты близка к стабильности частоты кварцевого генератора и значительно превосходит стабильность генератора с плавной настройкой.

Выразим отношение частот генератора, стабилизированного кварцем, и гетеродина с плавной настройкой через коэффициент  $M = \frac{f}{F}$ . Тогда нестабильность суммарной частоты определится по формуле

$$\frac{\Delta f_1}{f_1} = \frac{\Delta f}{f} + \frac{\Delta F}{MF}.$$

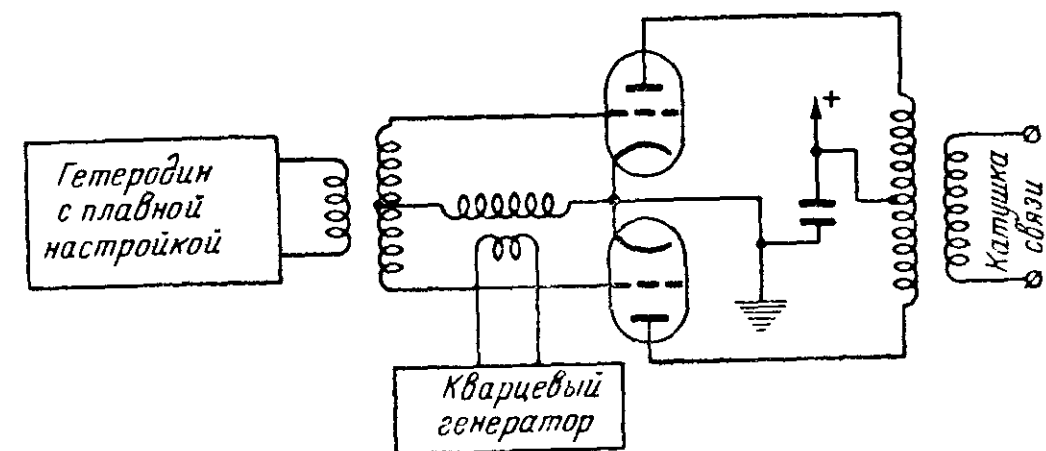
Крупный недостаток такой простейшей схемы кварцевой стабилизации в плавном диапазоне — обилие комбинационных частот и их гармоник в спектре генератора. Поэтому применять эту схему в радиопередатчиках можно лишь при наличии режекторных фильтров, настроенных на паразитные частоты и устраняющие их. Однако этот способ весьма сложен и в любительских условиях себя не оправдывает.

Лучшие результаты дает применение балансного модулятора. Один из вариантов схем с балансным модулятором показан на фиг. 19.

Балансный модулятор состоит из двух идентичных ламп (или одной «сдвоенной» лампы — двойного триода, двойного пентода и т. п.). Параметры этих ламп должны быть одинаковыми, в противном случае режим работы балансного модулятора нарушится.

Как видно из схемы фиг. 19, напряжение с кварцевого генератора подается на управляющие сетки ламп балансного модулятора синфазно, в то время как напряжение с низкочастотного гетеродина попадает на них в противофазе.

При отсутствии напряжения низкой частоты потенциалы на сетках ламп будут одинаковы. Колебательные токи в анодных цепях также окажутся равными по величине и фазе, поэтому в катушке связи они возбудят э. д. с., одинаковые по величине, но противоположные по знаку, т. е.



Фиг. 19. Вариант схемы кварцевой стабилизации в плавном диапазоне частот с применением балансного модулятора.

уравновешивающие друг друга. Нетрудно заметить, что подобная компенсация будет происходить всегда, когда напряжения высокой частоты на сетках ламп синфазны.

Включим теперь низкочастотный генератор. При этом равенство потенциалов на сетках ламп нарушится, что приведет к соответствующему перераспределению колебательных токов в анодных цепях ламп и э. д. с., наводимых в катушке связи. Одна из э. д. с. получит преобладание над другой, поэтому полной их компенсации не произойдет, и на концах катушки связи появится напряжение.

Математически можно доказать, что в этом случае в катушке связи циркулируют токи с частотами  $F$ ,  $f + F$  и  $f - F$ . Амплитуда колебаний низкочастотного напряжения обычно очень мала, поскольку катушка связи с малой индуктивностью, рассчитанная на высокую частоту, представляет для токов низкой частоты чрезвычайно малое сопротивление, близкое к короткому замыканию. Основное достоинство балансного модулятора, как видим, заключается

в устранении частоты  $F$  и четных гармоник из спектра частот, выделяемых в катушке связи.

Если колебания высокой частоты подавать на сетки ламп в противофазе, а низкочастотные колебания — синфазно, то результирующий спектр будет содержать частоты  $f$ ,  $f + F$  и  $f - F$ ; следовательно, для нашего случая такой вариант непригоден.

В радиопередающих устройствах с описанным задающим генератором антенной излучается либо разностная, либо суммарная частота. Разделение частот и выделение колебаний желаемой частоты осуществляются полосовыми фильтрами в последующих ступенях усиления.

Кварцевые генераторы с плавной настройкой, построенные по схеме балансной модуляции, могут быть рекомендованы для применения в любительских передатчиках, несмотря на большую сложность по сравнению с обычными генераторами.

### КВАРЦЕВАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ УЛЬТРАВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Многие радиолюбители, работающие на ультракоротких волнах, отказываются от применения кварцевой стабилизации из-за отсутствия кварцевых пластин, рассчитанных на ультравысокие частоты. Другие идут на усложнение своих передатчиков, используя в задающих генераторах сравнительно низкочастотные резонаторы с последующим многократным умножением частоты. Ниже описываются различные способы кварцевой стабилизации, применяемые в диапазоне ультракоротких волн, а также указываются пути к упрощению передатчиков, стабилизированных кварцем.

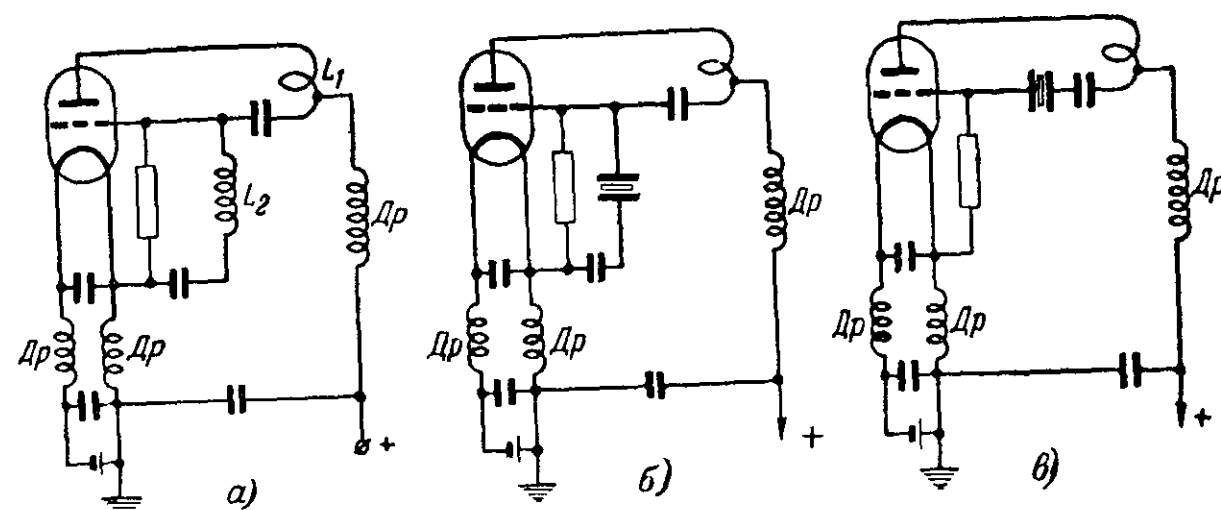
В настоящее время кварцевые пластины изготавливаются на частоты до 100 мГц. При этом чаще всего используются срезы  $X$  и  $BT$  вследствие их сравнительно больших частотных коэффициентов. Ранее находили применение пластины из турмалина. Турмалин менее хрупок, чем кварц; его частотный коэффициент почти в полтора раза выше, однако добротность турмалиновых резонаторов, и особенно их температурный коэффициент частоты, значительно хуже соответствующих параметров резонаторов, изготовленных из кварца.

Ультравысокочастотные пластины обычно делаются круглыми и крепятся зажатием по плоскости. В смысле технологии изготовления ультракоротковолновые резонаторы отно-

сятся к разряду прецизионных. Их производство связано с большими трудностями; этим и объясняются высокая стоимость и малая распространенность ультракоротковолновых кварцев.

При разработке кварцевых генераторов ультракоротковолнового диапазона приходится учитывать влияние не только внутриламповых емкостей, но и индуктивностей вводов и деталей лампы.

Схемы ультракоротковолновых кварцевых генераторов имеют много общего со схемами обычных ультракоротковолновых генераторов, работающих на самовозбуждении. На



Фиг. 20. Схемы ультракоротковолновых генераторов.

фиг. 20,а показана схема ультракоротковолнового генератора с самовозбуждением, а на фиг. 20,б и в приведены подобные ей схемы кварцевых генераторов. Нетрудно заметить, что последние схемы относятся к схемам с затягиванием, и генерация в них существует независимо от того, возбуждается кварц или нет.

Схема фиг. 20,б генерирует на частоте, близкой к параллельному резонансу пластины, так как полное сопротивление сеточной цепи наиболее велико именно на этой частоте.

Схема фиг. 20,в генерирует на частоте, близкой к последовательному резонансу кварца, так как последний является элементом связи, и его сопротивление минимально именно на этой частоте.

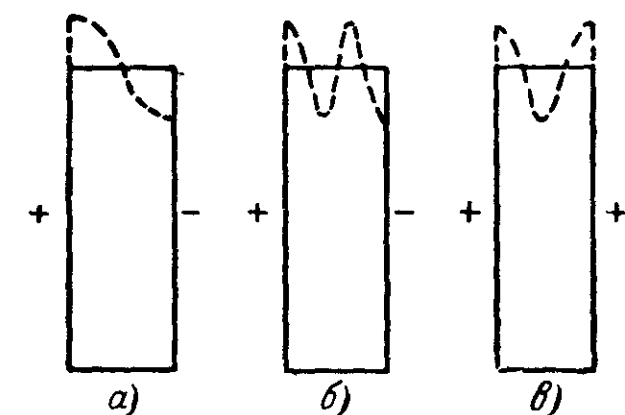
Обычные осцилляторные схемы на ультракоротких волнах применяются редко, поскольку резонаторы на эти частоты обладают пониженной добротностью и хорошо возбуждаются лишь в схемах затягивания.



При отсутствии кварцевого резонатора на основную частоту прибегают к умножению частоты кварца. Недостатком этого способа кварцевой стабилизации является, как уже было отмечено, усложнение схемы, увеличение числа ступеней и деталей передатчика.

В этом случае хорошие результаты дает широкодиапазонная схема фиг. 14,б, которая богата гармониками и может генерировать на частотах вплоть до 20 мГц и более (с достаточно активными кварцами).

Существует также способ кварцевой стабилизации с использованием механических гармоник кварцевого резонатора. Этот способ мало известен и в любительской практике еще не применялся.



Фиг. 21. Возбуждение кварцевого резонатора на механических гармониках.

Кварцевые резонаторы могут возбуждаться не только на основной частоте, но и на гармониках механических колебаний. Рассмотрим в качестве примера случай поперечных колебаний пластин X-среза.

При колебаниях на основной частоте вдоль толщины

кварца укладывается половина длины волны упругих колебаний (фиг. 21,а), причем заряды на противоположных гранях различны по знаку.

При колебаниях на нечетных гармониках вдоль толщины пластины укладывается нечетное число полуволн (фиг. 21,б), и знаки зарядов на противоположных гранях также различны.

Если же к электродам пластины подводится напряжение четной гармоники, то вдоль толщины располагается четное количество полуволн, и знаки зарядов на обеих гранях оказываются одинаковыми. Ясно, что при этом пьезоэлектрический эффект отсутствует, и поэтому возбуждение колебаний на четных гармониках невозможно (фиг. 21,в).

В обычных генераторных схемах удастся использовать лишь сравнительно низкие номера нечетных механических гармоник (в лучшем случае — 5), что объясняется следующим.

На механических гармониках эквивалентная емкость кварца  $C_1$  уменьшается пропорционально номеру гармоники. Так, например, на третьей механической гармонике она становится приблизительно в 3 раза меньше, чем на основной частоте, на пятой — в 5 раз и т. д. Статическая же емкость  $C_0$ , которая определяется междуэлектродной емкостью кварцедержателя, емкостью монтажа и т. п., остается постоянной. В результате по мере возрастания номера гармоники отношение статической и эквивалентной емкостей резонатора  $\frac{C_0}{C_1}$  увеличивается, а полное сопротивление эквивалентного контура кварца падает. Это вызывает уменьшение

отдачи генератора и ограничивает номер гармоники, при котором условия самовозбуждения генератора еще выполняются.

Для повышения полного сопротивления эквивалентного контура резонатора параллельно кварцу подключается индуктивность, величина которой подбирается таким образом, чтобы контур, образованный ею и статической емкостью кварца, был настроен на частоту, близкую к выбранной гармонике резонатора, но несколько превышающую ее.

Анодный контур также настраивается на частоту, несколько более высокую, чем частота используемой механической гармоники. При этом осцилляторная схема генератора превращается в схему с затягиванием.

Контроль генерации осуществляется с помощью микроамперметра, включенного последовательно с сопротивлением утечки сетки лампы. Настройка генератора ведется в следующей последовательности.

1. Анодный контур генератора настраивается приблизительно на частоту выбранной механической гармоники.

2. Величина индуктивности, подключенной параллельно кварцу, подбирается так, чтобы величина сеточного тока лампы была максимальна.

3. Подстраивается анодный контур. Момент настройки на механическую гармонику определяется по резкому скачку сеточного тока.

Следует учитывать, что на механических гармониках возбуждаются далеко не все резонаторы, а только те из них, которые обладают достаточно высокой активностью и очень хорошо генерируют на основной частоте. Наилучшие результаты получаются с пластинами срезов АТ и Х. Такие кварцы удается возбудить на весьма высоких номерах механических гармоник, вплоть до 15-й — 19-й. С пластиной на

5,67 мггц удавалось непосредственно, без электрического умножения получить частоту 85 мггц, соответствующую любительскому диапазону.

В качестве генераторных ламп следует использовать пентоды с высокой крутизной и малой входной емкостью. Неплохие результаты были получены с пентодом 6ЖЗП.

Использование гармоник механических колебаний кварца позволяет значительно упростить схему ультракоротковолнового передатчика. Подстройкой индуктивности в цепи кварца можно в некоторых пределах изменять частоту генерации. Используя в качестве регулирующей индуктивности реактивную лампу, можно осуществить частотную модуляцию кварцевого генератора.

Недостаток, описанной схемы тот же, что и во всех схемах затягивания. Он заключается в опасности паразитного самовозбуждения на частоте, отличной от частоты кварца (его механической гармоник). Несмотря на это, подобный метод кварцевой стабилизации в диапазоне ультракоротких волн заслуживает самого пристального внимания и представляет широкое поле деятельности для радиолюбителей-экспериментаторов.

### КОНСТРУИРОВАНИЕ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Высокие эталонные свойства кварцевых резонаторов далеко не всегда используются в полной мере. Иногда, несмотря на наличие кварцевой стабилизации, передатчик работает неустойчиво, его частота заметно изменяется как во времени, так и при телеграфной манипуляции. Это, как правило, объясняется неправильным режимом работы генератора, плохим качеством деталей, неудовлетворительным конструктивным оформлением, перегруженностью кварцевого резонатора, колебаниями питающих напряжений и т. п.

Следует твердо помнить, что любая из схем кварцевых генераторов способна обеспечить достаточно высокую стабильность частоты генерируемых колебаний при хорошем конструктивном оформлении, правильном выборе режима, выполнении необходимых мер по борьбе с дестабилизирующими факторами и т. д. и, наоборот, даже самая высокостабильная схема не даст хороших результатов, если эти условия не будут соблюдены.

В процессе конструирования генератора с кварцевой стабилизацией нужно предусмотреть следующие меры, которые необходимы для получения высокой стабильности частоты

колебаний и полной реализации эталонных свойств кварцевого резонатора.

1. Стабилизация питающих напряжений (стабилизаторы, электронные, ферромагнитные и резонансные стабилизаторы). Рекомендуется питание задающего генератора осуществлять от автономного выпрямителя. Необходимо правильно рассчитывать мощность силовых трансформаторов и не допускать перегрузки выпрямителей, в противном случае питающие напряжения будут резко меняться при телеграфной манипуляции.

2. Устранение влияния нагрузки на частоту колебаний задающего генератора (буферные ступени, работающие без сеточных токов, слабая связь нагрузки с генератором).

3. Правильное конструктивное оформление и монтаж генератора. В условиях любительской радиосвязи применение термостатов (устройств, предназначенных поддерживать постоянство рабочей температуры кварцевого резонатора или иных элементов схемы) и герметизированных экранов, предохраняющих детали генератора от влияния влажности, не является необходимым; следует, однако, располагать кварц и настроенные колебательные контуры в достаточном удалении от ламп, а также содержать генератор в сухом месте, применять влагостойкие детали, изоляторы из керамики, конденсаторы и катушки индуктивности с малыми температурными коэффициентами. Серьезное значение имеют механическая прочность деталей генератора и его конструкции в целом. При тряске или толчках на частоту генерации могут влиять колебания пластин воздушных конденсаторов и перемещения монтажных проводов.

4. Правильный выбор режима работы кварцевого резонатора. Мы уже отмечали, что при перегрузке кварца последний может разрушиться вследствие чрезмерных механических деформаций или электрического пробоя. Перегруженная пластина нагревается колебательным током до высокой температуры, что ухудшает стабильность частоты колебаний и может вызвать отпаивание токоподводящих проводочков (в резонаторах с круглыми пластинами и креплением по трем точкам).

### НАЛАЖИВАНИЕ КВАРЦЕВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Для налаживания кварцевых генераторов желательно иметь следующие приборы: катодный вольтметр для измерения высокочастотных напряжений в различных цепях гене-

ратора, высокочастотный миллиамперметр для измерения колебательного тока в цепи кварцевого резонатора, миллиамперметр (или микроамперметр) для измерения анодного и сеточного токов генераторной лампы и стандарт-сигнал-генератор для настройки колебательных контуров генератора.

Налаживание генератора производится в следующей последовательности.

1. С помощью пробника или омметра проверяется правильность монтажа схемы.

2. К генератору подключаются источники питания и измеряется режим работы ламп (напряжение на анодах и экранных сетках, анодные токи, смещения на управляющих сетках).

3. На управляющую сетку лампы подается напряжение с генератора стандартных сигналов и измеряется высокочастотное напряжение на анодном контуре (катодным вольтметром) или сеточный ток (микроамперметром постоянного тока). Контур настраивается на частоту, соответствующую условиям самовозбуждения выбранной схемы. Настройка ведется по максимуму показаний прибора. При этом следует учитывать емкость, вносимую в контур катодным вольтметром.

4. Включается кварцевый резонатор. Последовательно с ним подключается высокочастотный миллиамперметр для контроля колебательного тока, текущего через кварц. При отсутствии генерации в схеме с включением кварца между сеткой и катодом необходимо, как уже упоминалось, увеличить на несколько пикофард емкость между анодом и сеткой.

5. Подгоняется режим работы кварцевого резонатора. Мощность, рассеиваемая на кварце (величина колебательного тока), регулируется путем подбора анодного и экранного напряжений и сопротивления утечки сетки. Она понижается при уменьшении питающих напряжений и величины сопротивления утечки, которое может изменяться в пределах от нескольких тысяч и до миллиона ом. Подбором питающих напряжений и величины сопротивления утечки, а также настройкой анодного контура добиваются выделения в нем максимальной полезной мощности при нормальной нагрузке кварцевого резонатора.

Рекомендуемая методика наладки применима главным образом к осцилляторным схемам с настроенными ко-

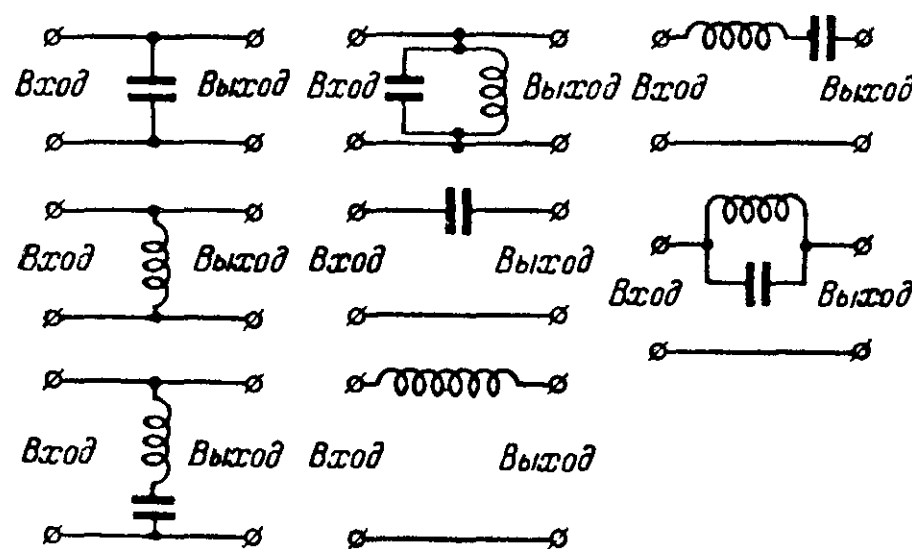
лебательными контурами. При наличии достаточного опыта наладка кварцевых генераторов можно производить и без помощи приборов, применяя в качестве индикаторов лампочки накаливания (1 в, 0,075 а) и неоновые лампочки.

## ГЛАВА ТРЕТЬЯ

### КВАРЦЕВЫЕ ФИЛЬТРЫ

#### ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ФИЛЬТРАХ

В технике связи нередко встречается необходимость разделить токи различных частот, задержать одни из них и пропустить другие. Такие задачи выполняются электрическими фильтрами. Под фильтром подразумевается такая



Фиг. 22. Простейшие электрические фильтры

электрическая схема, которая оказывает разное сопротивление различным участкам спектра частот колебаний, подаваемых на ее вход.

Обычные реактивные элементы — индуктивность и емкость и их соединения в виде последовательной или параллельной цепи, — включенные, например, согласно фиг. 22, могут рассматриваться как простейшие электрические фильтры, поскольку их сопротивления для токов разных частот различны. На практике, однако, избирательные качества таких фильтров оказываются недостаточными, для повышения этих качеств приходится прибегать к более сложным комбинациям реактивных элементов.

В зависимости от характера пропускания частот фильтры подразделяются на четыре группы:

1. Полосовые фильтры, пропускающие определенную полосу частот и задерживающие все прочие частоты. Такие фильтры называют также полосно-пропускающими.

2. Заграждающие или «режекторные» фильтры, задерживающие определенную полосу частот и пропускающие все остальные частоты.

3. Фильтры нижних частот, пропускающие все частоты ниже заданной граничной частоты и задерживающие более высокие частоты.

4. Фильтры верхних частот, пропускающие все частоты выше заданной граничной частоты и задерживающие более низкие частоты.

Основным показателем фильтра является его характеристика затухания, которая представляет собой зависимость отношения напряжения на входе фильтра к напряжению на его выходе от частоты.

В отличие от характеристики затухания под резонансной кривой фильтра понимается зависимость напряжения на его выходе от частоты при постоянном входном напряжении.

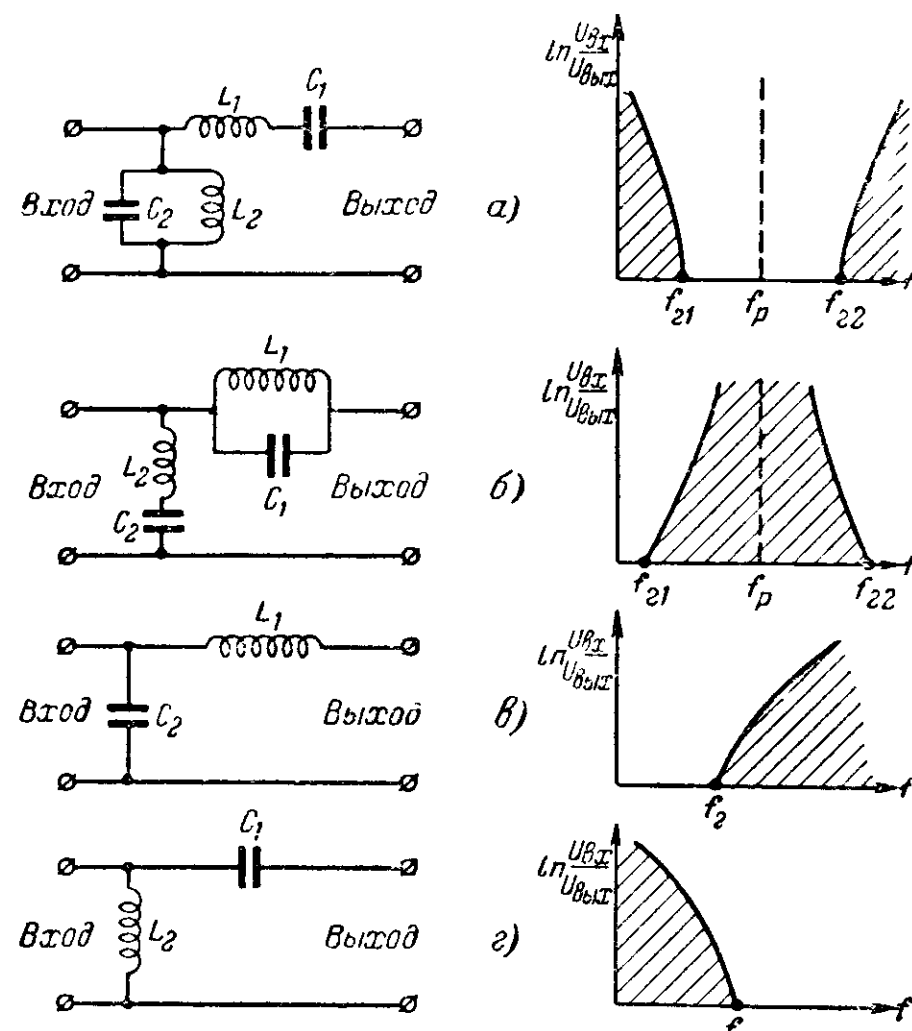
Резонансные кривые обычно строятся в линейном масштабе, а характеристики затухания в логарифмическом (отношения напряжений выражаются в децибелах или неперах).

Рассмотрим идеализированные характеристики затухания вышеперечисленных типов фильтров.

На фиг. 23,а приведены простейшая схема полосового фильтра и его характеристика затухания. Этот фильтр состоит из двух колебательных цепей: параллельной ветви и последовательной ветви. Эти цепи настроены в резонанс, и резонансная частота является средней частотой полосы пропускания («прозрачности») фильтра. Реактивное сопротивление последовательной колебательной цепи для токов резонансной частоты равно нулю; сопротивление параллельного контура на той же частоте очень велико, поэтому в пределах некоторой полосы частот, которая и является полосой пропускания, напряжение на выходе фильтра приблизительно равно напряжению на его входе. По обе стороны от полосы пропускания расположены полосы непропускания («непрозрачности», задерживания). По мере удаления от граничных частот  $f_{z1}$  и  $f_{z2}$  напряжение на выходе фильтра

$U_{вых}$  уменьшается и, следовательно, отношение  $\frac{U_{вх}}{U_{вых}}$  возрастает.

На фиг. 23,б представлены схема и характеристика затухания простейшего заграждающего (режекторного) фильтра. Этот фильтр, так же как и предыдущий, состоит из двух ко-



Фиг. 23. Схемы и характеристики фильтров.  
а — полосовой фильтр; б — заграждающий фильтр; в — фильтр нижних частот; г — фильтр верхних частот.

лебательных цепей, однако последовательная резонансная цепь включена в параллельную ветвь фильтра, а параллельный контур — в его последовательную ветвь, в результате чего действие такого фильтра обратно рассмотренному выше. Для токов, лежащих в некоторой полосе частот, которая именуется полосой задерживания, реактивное сопротивление параллельной ветви мало, а реактивное сопротивление последовательной ветви велико. По мере удаления от гранич-

ных частот отношение напряжений  $\frac{U_{вх}}{U_{вых}}$  уменьшается от очень большой величины до единицы.

На фиг. 23,в даны схема и характеристика затухания простейшего фильтра нижних частот. Последовательной ветвью такого фильтра является индуктивность; его параллельная ветвь состоит из емкости. Для постоянного тока ( $f=0$ ) реактивное сопротивление параллельной ветви бесконечно велико, а реактивное сопротивление последовательной ветви равно нулю. При этом выходное напряжение равно входному и отношение  $\frac{U_{вх}}{U_{вых}} = 1$ . По мере повышения частоты сопротивление последовательной ветви возрастает, в то время как сопротивление параллельной ветви уменьшается. Начиная с некоторой частоты, принимаемой за граничную, отношение входного и выходного напряжений становится заметно больше единицы и по мере дальнейшего повышения частоты продолжает резко возрастать.

На фиг. 23,г изображены принципиальная схема и характеристика затухания простейшего фильтра верхних частот. Этот фильтр, так же как и предыдущий, составлен из индуктивности и емкости, однако емкость включена не в параллельную ветвь, как это имело место в фильтре нижних частот, а в последовательную. Поэтому свойства этих фильтров обратны. Сопротивление параллельной ветви (индуктивности) велико для высоких частот и равно нулю для постоянного тока. Сопротивление последовательной ветви, наоборот, очень велико для низких частот и уменьшается по мере повышения частоты. Полоса пропускания фильтра верхних частот ограничена со стороны низких частот граничной частотой, а все более высокие частоты пропускаются без затухания.

Рассматривая действие фильтров, мы не учитывали активного сопротивления, считая, что оно отсутствует. Фильтр (так же как и контур), элементы которого не имеют активной составляющей сопротивления, называется «идеальным». Осуществить «идеальный» фильтр на практике невозможно, так как любой реактивный элемент имеет некоторое активное сопротивление. Поэтому сопротивление реального последовательного контура току резонансной частоты не равно нулю, а сопротивление параллельного контура при резонансе не равно бесконечности. Понятия «идеального контура» и «идеального фильтра» были введены для того,

чтобы упростить анализ реальных контуров и фильтров. Колебательный контур тем ближе по своим характеристикам к идеальному, чем больше добротность составляющих его реактивных элементов. Современные конденсаторы обладают очень малыми потерями и добротность их велика. Однако катушки индуктивности до настоящего времени не удается изготовить с достаточно высокой добротностью. Поэтому добротность колебательного контура в основном определяется добротностью катушки индуктивности.

Эквивалентное сопротивление контура по мере удаления от резонансной частоты изменяется тем более резко, чем выше его добротность. Таким образом, скаты резонансной кривой контура с высокой добротностью круче, а полоса пропускания уже, чем у контура с низкой добротностью. Сказанное относится и к фильтрам.

Поскольку избирательные качества фильтра ограничиваются добротностью его элементов и, в частности, катушек индуктивности, дальнейшее повышение избирательности (сужение полосы пропускания, повышение крутизны скатов резонансной кривой) может быть достигнуто только путем применения кварцевых резонаторов, обладающих в сотни раз более высокой добротностью, чем обычные колебательные контуры.

К преимуществам кварцевых фильтров, кроме высоких избирательных свойств, относится также их высокая стабильность, обусловленная прекрасными эталонными свойствами кварцевых резонаторов.

Малую ширину полосы пропускания, помимо полосовых кварцевых фильтров, можно получить с помощью регенеративных ламповых фильтров. В этих фильтрах узкая полоса достигается за счет обратной связи, вносящей в контур отрицательное сопротивление, снижающей потери в нем и, тем самым, искусственно повышающей его добротность.

Однако регенеративные фильтры уступают кварцевым и в отношении крутизны скатов, характеристики затухания и, в особенности, по стабильности. Резонансная кривая регенеративного фильтра (характеристика его затухания) зависит от многих факторов (режима работы лампы, ее параметров и т.п.).

В любительских конструкциях регенеративные фильтры еще находят некоторое применение благодаря большей простоте и меньшей стоимости по сравнению с кварцевыми, но сам факт такого применения можно считать лишь суррогат-



ной мерой, допустимой только в простых и дешевых установках. Регенеративные фильтры целесообразно применять на звуковых частотах (при телеграфной работе), так как кварцевые фильтры, рассчитанные на эти частоты, чрезвычайно дороги и дают слишком узкую полосу пропускания.

### КВАРЦЕВЫЕ ФИЛЬТРЫ В ЛЮБИТЕЛЬСКОЙ РАДИОСВЯЗИ

Наибольшее применение в технике связи находят полосовые кварцевые фильтры. В радиоприемных устройствах такие фильтры применяются для повышения избирательности усилителя промежуточной частоты супергетеродина.

Кварцевые фильтры рассчитываются на различные полосы пропускания и могут использоваться как в первоклассных вещательных приемниках, так и в приемниках, предназначенных для радиотелеграфной связи.

При телеграфной передаче происходит попеременное включение и выключение тока (манипуляция), сопровождающееся переходными нестационарными процессами. С физической точки зрения телеграфная манипуляция высокочастотных токов может быть представлена как модуляция их низкой частотой, так как импульсы постоянного тока могут рассматриваться как переменный ток, частота которого зависит от скорости чередования импульсов и пауз между ними. Чем выше скорость телеграфной работы, тем более высока частота эквивалентного переменного тока.

Как видим, скорость манипуляции определяет минимальную ширину полосы пропускания, достаточную для неискаженного приема. Ширина полосы, занимаемая телеграфными сигналами, будучи выражена в герцах, определяется формулой

$$\Delta f = 2,4n,$$

где  $n$  — число стандартных слов передачи в минуту.

При работе со скоростью 100 знаков в минуту (20 стандартных слов) ширина полосы равна приблизительно 50 гц. С учетом нестабильности частот передатчика и гетеродина ширину полосы приемника нужно увеличить до 100—150 гц. Эти цифры определяют минимальную потребную полосу пропускания кварцевого фильтра при данной скорости телеграфирования.

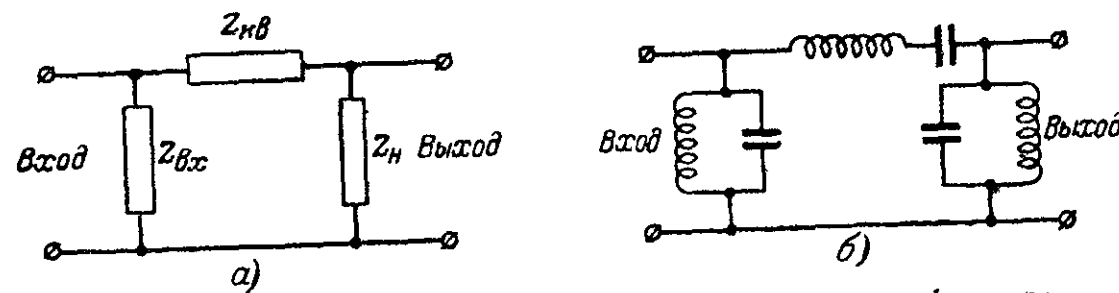
В любительских приемниках для коротковолновой радиосвязи до настоящего времени применяются простейшие

кварцевые фильтры с плавной регулировкой ширины полосы пропускания в пределах от 50—100 гц и до нескольких сот герц. При переходе на прием телефона такие фильтры, как правило, выключаются.

Ниже мы рассмотрим, как самые простые и общеизвестные схемы кварцевых фильтров, так и более сложные, которые пока еще не применяются в любительских конструкциях.

### РАБОТА КВАРЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА В ПОЛОСОВОМ ФИЛЬТРЕ

Как было установлено выше, кварцевый резонатор электрически эквивалентен последовательной колебательной цепи, зашунтированной статической емкостью. На фиг. 24,а представлена эквивалентная схема простейшего кварцевого фильтра.



Фиг. 24. Кварцевый резонатор в схеме полосового фильтра.

Для упрощения анализа допустим, что статическая емкость кварца отсутствует (на практике она обычно уравнивается). Тогда схема фиг. 24,а вполне равноценна схеме обычного П-образного полосового фильтра, показанной на фиг. 24,б.

Обозначим полное сопротивление входного параллельного контура через  $Z_{вх}$  и сопротивление нагрузки через  $Z_{н}$ . Из эквивалентной схемы вытекает, что общая нагрузка резонатора равна сумме  $Z_{вх} + Z_{н}$ , поскольку он зашунтирован последовательным соединением этих сопротивлений. Величина эквивалентной индуктивности кварцевого резонатора  $L_1$  во много раз больше нагрузочных индуктивностей, поэтому последними можно пренебречь и с полным основанием считать, что суммарная индуктивность цепи равна эквивалентной индуктивности кварца.

Известно, что добротность цепи выражается формулой

$$Q = \frac{\omega L}{R}$$

При настройке контуров в резонанс с частотой кварца их сопротивления чисто активны. Обозначим суммарное активное сопротивление цепи через  $R_{\Sigma}$ . Тогда

$$R_{\Sigma} = R_{\text{вх}} + R_{\text{кв}} + R_{\text{н}},$$

где  $R_{\text{вх}}$  и  $R_{\text{н}}$  — активные сопротивления контуров;

$R_{\text{кв}}$  — активное сопротивление кварцевого резонатора.

Отсюда добротность цепи определяется уравнением

$$Q = \frac{\omega L_1}{R_{\Sigma}} = \frac{\omega L_1}{R_{\text{вх}} + R_{\text{кв}} + R_{\text{н}}}.$$

Из этой формулы видно, что чем больше нагрузочное сопротивление, тем ниже добротность цепи и, следовательно, шире полоса пропускания фильтра. Наибольшая ширина полосы пропускания получается в том случае, если входной и нагрузочный контуры настроены точно на резонансную частоту кварцевого резонатора. При этом эквивалентные сопротивления контуров максимальны и в цепь кварца вносится наибольшее затухание. По мере расстройки контуров относительно резонансной частоты кварцевого резонатора эквивалентные сопротивления контуров падают, вследствие чего ширина полосы пропускания уменьшается.

Таким образом, в подобной фильтровой схеме полоса пропускания зависит не только от параметров кварца, но и от величины нагрузочных сопротивлений. Изменяя последние, можно в некоторых пределах регулировать ширину полосы пропускания.

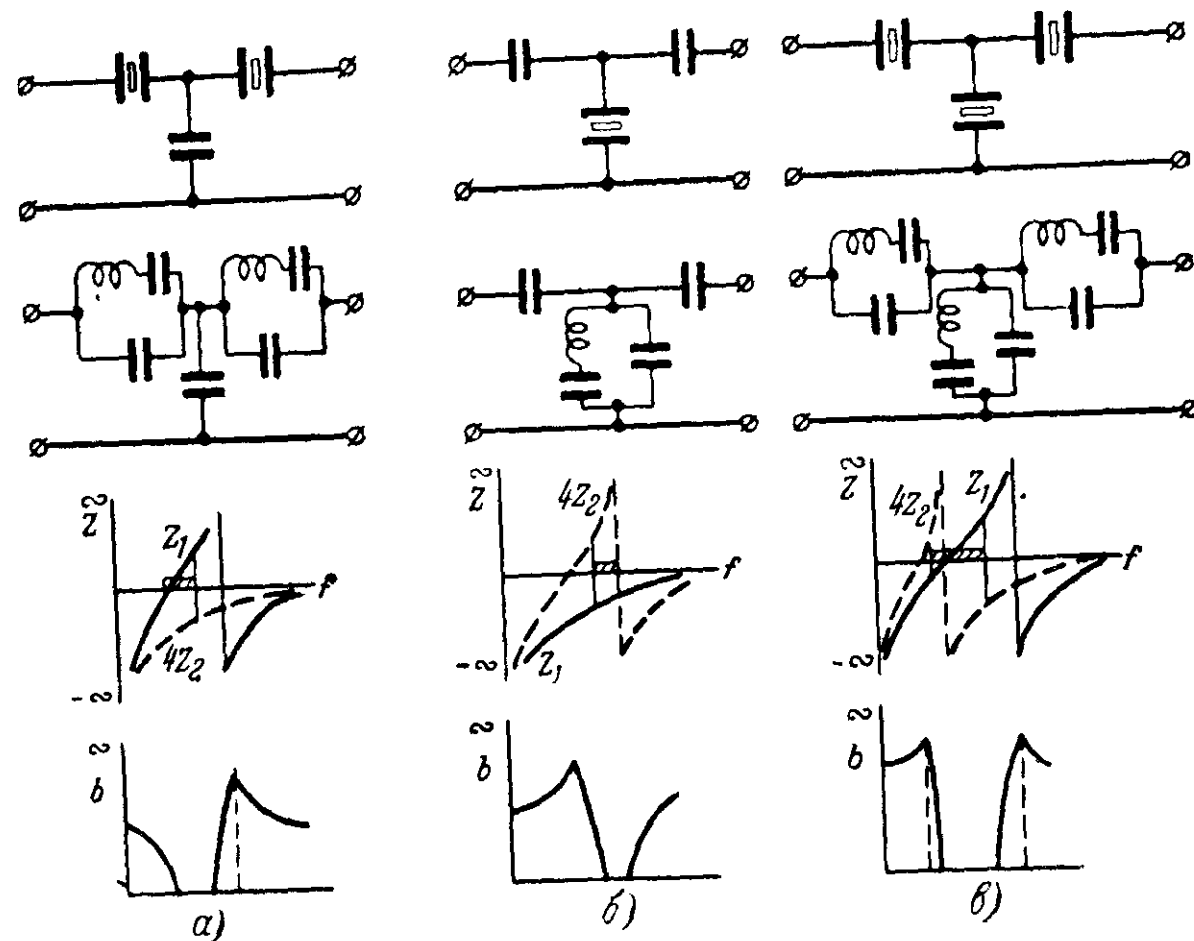
### ТИПЫ КВАРЦЕВЫХ ФИЛЬТРОВ

Существуют две разновидности кварцевых фильтров: цепочные фильтры и мостовые фильтры.

На фиг. 25 показаны принципиальные и эквивалентные схемы цепочных фильтров, составленных из кварцевых резонаторов и емкостей (заметим, что такие фильтры обычно называют «чисто кварцевыми» или узкополосными). Там же даны кривые реактивного сопротивления ветвей фильтров (реактивные сопротивления последовательных ветвей изображены сплошными линиями, а параллельных — штриховыми) и характеристики затухания.

Рассматривая характеристики затухания фильтров (фиг. 25, а и б), нетрудно заметить, что они асимметричны,

вследствие чего такие фильтры не могут удовлетворить практическим требованиям. Практическим требованиям удовлетворяет только фильтр фиг. 25, в, поскольку только с ним можно получить симметричную характеристику затухания. Однако и в этом случае симметричность характеристики может быть достигнута лишь специальным подбором индук-



Фиг. 25. Принципиальные и эквивалентные схемы цепочных фильтров, составленных из кварцевых резонаторов и емкостей.

тивностей кварцевых резонаторов. Индуктивности резонаторов в последовательных ветвях должны в несколько раз превышать индуктивность кварца в параллельной ветви, что чрезвычайно усложняет налаживание фильтра и исключает возможность его применения в любительских условиях.

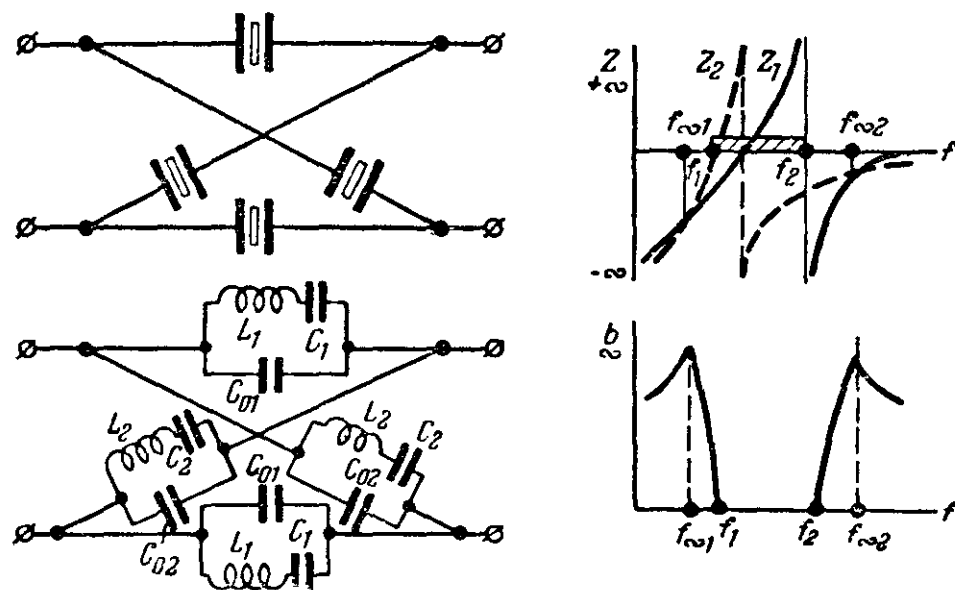
В любительских конструкциях могут применяться комбинированные (широкополосные) цепочные фильтры, составленные не только из кварцев и емкостей, но и из индуктивностей. Схемы этих фильтров будут рассмотрены ниже.

В мостовых фильтрах кварцевые резонаторы включаются в плечи равновесного моста. На фиг. 26 показаны принципиальная и эквивалентная схемы «классического» мостового

фильтра, характеристики сопротивления его смежных плеч, а также характеристика затухания.

Частоты противоположных плеч равны. Частоты кварцев в смежных плечах сдвинуты друг относительно друга таким образом, что частота параллельного резонанса одной пары плеч совпадает с частотой последовательного резонанса другой пары.

Условием пропускания мостового фильтра является равенство знаков реактивных сопротивлений смежных плеч моста. В полосе задерживания реактивные сопротивления



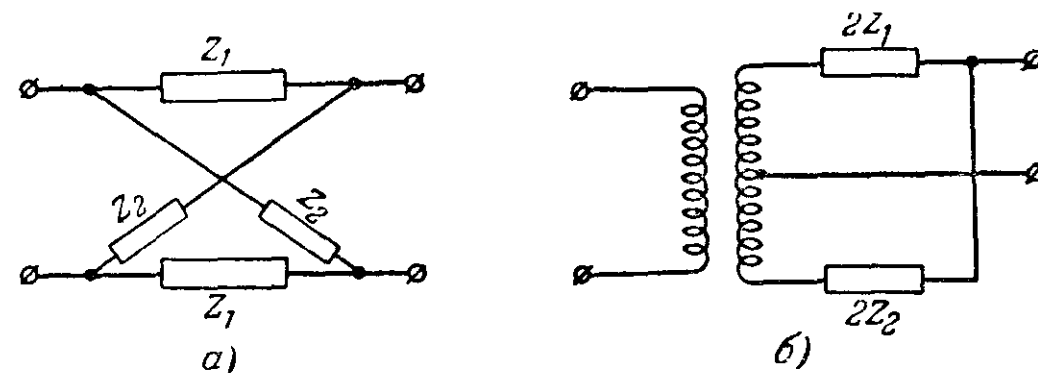
Фиг. 26. „Классический“ мостовой фильтр.

плеч мостового фильтра имеют одинаковые знаки и близки по величине. Поэтому затухание моста очень велико, так как он близок к положению баланса. В точках пересечения кривых реактивных сопротивлений смежных плеч наступает баланс, и затухание достигает максимума. Эти точки обычно называют точками бесконечного затухания. В полосе пропускания кривые реактивных сопротивлений смежных плеч противоположны по знаку. Эта полоса равна удвоенному интервалу между частотами параллельного и последовательного резонанса кварца и практически не превышает 0,8% от резонансной частоты фильтра.

Классическая мостовая схема на практике не применяется. В практических схемах число плеч фильтра сокращается в 2 раза заменой двух смежных плеч дифференциальным трансформатором. На фиг. 27 даны равноценные эквивалентные схемы мостовых фильтров с двумя парами плеч

(фиг. 27,а) и с одной парой плеч, но с дифференциальным трансформатором (фиг. 27,б).

Практические схемы кварцевых фильтров с дифференциальными трансформаторами удобно классифицировать по числу кварцевых резонаторов, входящих в фильтр, так как качество характеристик затухания таких фильтров (крутиз-

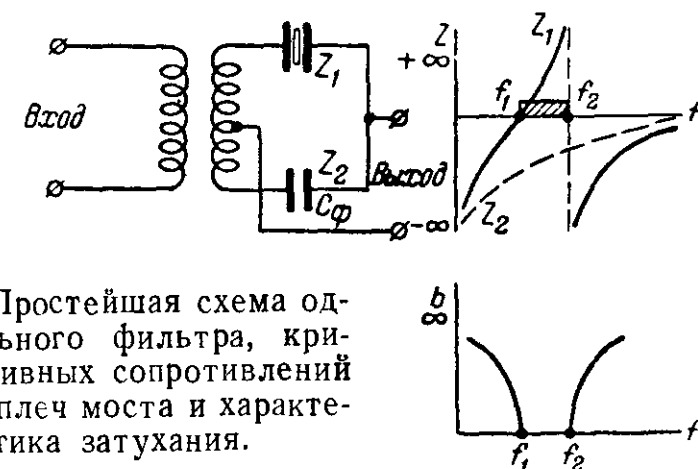


Фиг. 27. Замена классической мостовой схемы (а) схемой с дифференциальным трансформатором (б).

на скатов характеристики затухания, величина затухания в полосе задерживания) и стабильность их работы зависят от количества кварцевых резонаторов. Чем больше кварцев в фильтре, тем круче скаты характеристики затухания, больше величина затухания в полосе задерживания и стабильнее резонансная частота.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ КВАРЦЕВЫХ ФИЛЬТРОВ

В радиолюбительской практике чаще всего используются однокристалльные фильтры. На фиг. 28 показана упрощенная

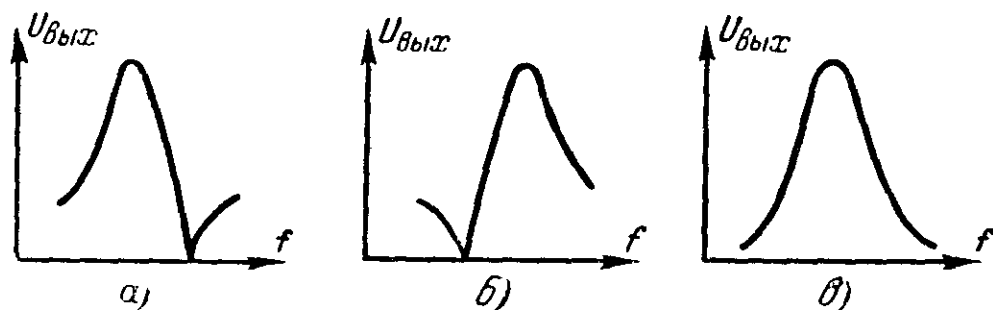


Фиг. 28 Простейшая схема однокристалльного фильтра, кривые реактивных сопротивлений смежных плеч моста и характеристика затухания.

схема, кривые реактивных сопротивлений смежных плеч и характеристика затухания такого фильтра. В одно из плеч моста включен кварц, в другое — емкость. Условия пропу-

скания в таком фильтре выполняются на участке между последовательным и параллельным резонансами кварца. Максимальная ширина полосы пропускания не превышает 0,4% от резонансной частоты фильтра.

Конденсатор, включенный в одно из плеч моста, называется фазирующим. Резонансная кривая однокристалльного фильтра будет симметрична лишь в случае равенства статической емкости кварца  $C_0$  и емкости фазирующего конденсатора  $C_\phi$ . При этом емкостные токи в смежных плечах моста равны по величине и противоположны по фазе, вследствие



Фиг. 29 Зависимость формы резонансной кривой фильтра от соотношения емкости фазирующего конденсатора и статической емкости кварца

$a$  — емкость  $C_\phi$  меньше  $C_0$ ,  $b$  — емкость  $C_\phi$  больше емкости  $C_0$ ,  
 $v$  — емкости  $C_\phi$  и  $C_0$  равны.

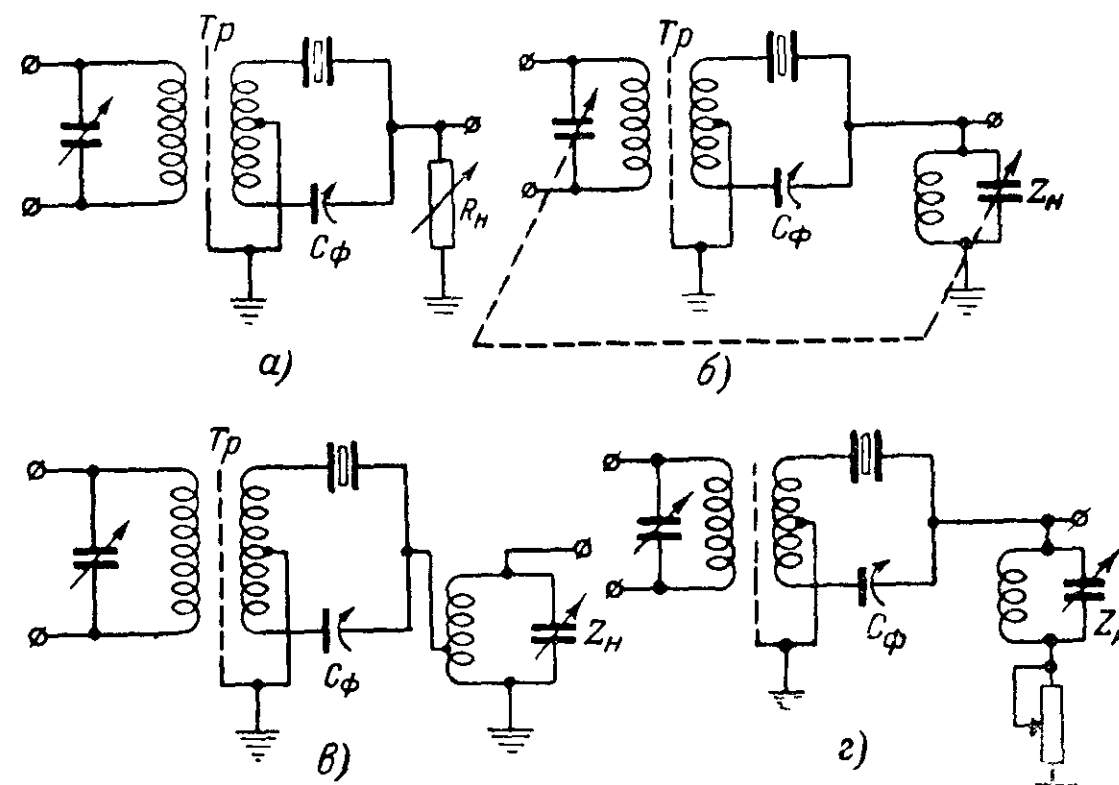
ствие чего они уравнивают друг друга, и кварц ведет себя так, как если бы его статическая емкость отсутствовала, т. е. подобно обычному последовательному контуру. Если емкость  $C_\phi$  меньше  $C_0$ , резонансная кривая имеет вид, представленный на фиг. 29,  $a$ , если  $C_\phi$  больше  $C_0$ , — кривая принимает вид фиг. 29,  $b$  и наконец, при равенстве этих емкостей — как фиг. 29,  $v$ .

Иногда ручку фазирующего конденсатора  $C_\phi$  выводят на переднюю панель приемника. Тогда, совмещая частоту бесконечного затухания с частотой мешающей станции, можно резко уменьшить влияние помехи.

Однокристалльные кварцевые фильтры не обладают высоким качеством характеристики затухания. Их применение объясняется относительной дешевизной, простотой конструирования и налаживания, а также возможностью регулировать ширину полосы пропускания.

На фиг. 30 показаны варианты практических схем однокристалльных кварцевых фильтров. В схеме фиг. 30,  $a$  регулировка полосы производится с помощью переменного ак-

тивного сопротивления нагрузки  $R_n$ . Недостатком этой схемы является резкое изменение коэффициента усиления ламповой ступени с фильтром при регулировке полосы. Поэтому такая схема находит применение лишь в тех случаях, когда требуется максимально упростить фильтр и уменьшить его габариты, а также тогда, когда ширина полосы в процессе эксплуатации остается постоянной.



Фиг. 30 Варианты практических схем однокристалльных кварцевых фильтров.

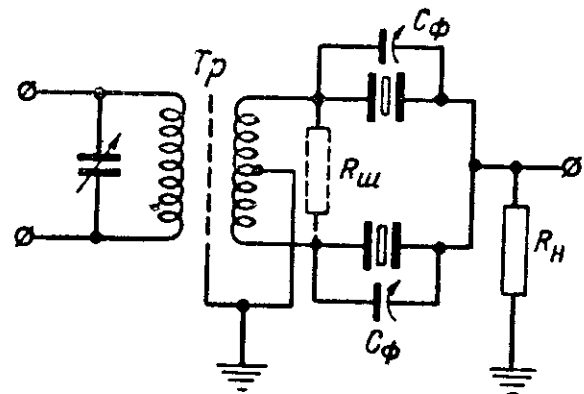
$a$  — регулировка ширины полосы пропускания переменным сопротивлением  $b$  — регулировка полосы расстройкой контуров,  $v$  — автотрансформаторная нагрузка  $z$  — регулировка полосы изменением полного сопротивления нагрузочного контура

В схеме фиг. 30,  $b$  регулировка полосы осуществляется путем расстройки нагрузочного контура и дифференциального трансформатора относительно частоты последовательного резонанса кварца. Более предпочтительна одновременная расстройка контуров в разные стороны, обеспечивающая сохранение симметричности кривой фильтра. Полоса пропускания расширяется по мере того, как резонансные частоты контуров приближаются к частоте кварца, и сужается по мере удаления от резонанса.

При необходимости повысить усиление ступени с фильтром рекомендуется использовать схему фиг. 30,  $v$  с автотрансформаторным выходом.

На фиг. 30,г приведена схема, в которой регулировка полосы производится путем введения последовательно с нагрузочным контуром переменного сопротивления.

На фиг. 31 показана типовая схема двухкристального мостового фильтра с дифференциальным трансформатором. Достоинством такого фильтра является лучшая, по сравнению с однокристалльным фильтром, характеристика затухания и более высокая стабильность; основным недостатком — постоянная ширина полосы пропускания, не поддающаяся регулировке в процессе эксплуатации.



Фиг. 31. Типовая схема двухкристального фильтра.

(что наиболее выгодно с точки зрения стабильности), настроенного контура или автотрансформатора. Величина нагрузочного сопротивления почти не влияет на ширину полосы двухкристального фильтра, но оказывает очень большое влияние на форму вершины резонансной кривой.

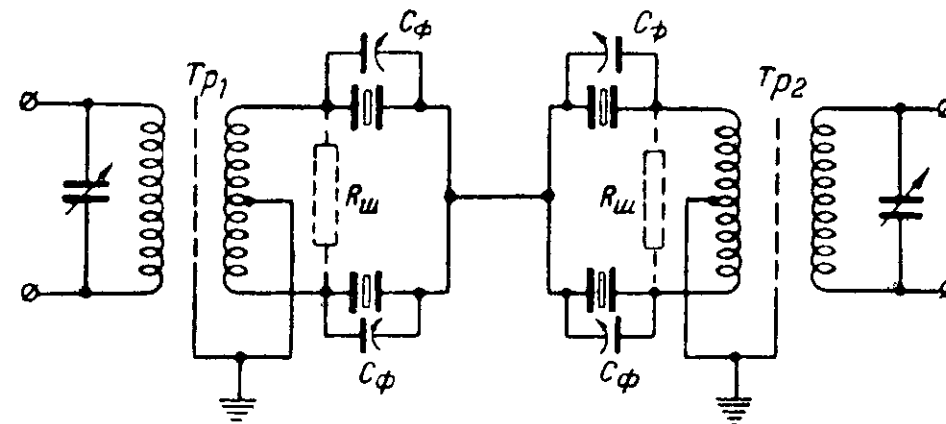
В двухкристальном фильтре с однотипными пластинами статические емкости резонаторов взаимно уравниваются. Фазирующие конденсаторы используются для установки частот бесконечного затухания, регулировки крутизны скатов характеристики затухания и величины затухания в полосе задерживания.

Двухкристальный фильтр можно рассматривать как звено (секция) четырехкристального фильтра. Принципиальная схема последнего представлена на фиг. 32.

Четырехкристальные фильтры применяются в современных высококачественных радиопремных устройствах для магистральной радиосвязи. В любительской практике они пока еще не находят применения в силу их сложности и трудностей, связанных с выбором кварцевых резонаторов. Однако подобные фильтры обладают превосходной характеристикой

затухания и в будущем, несомненно, будут использованы радиолюбителями-коротковолновиками.

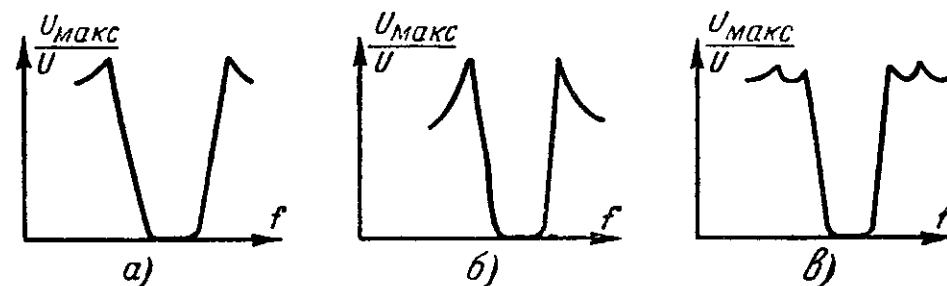
Характеристику затухания четырехкристального фильтра (фиг. 33,в) можно представить как результат перемножения двух характеристик двухкристальных фильтров с раз-



Фиг. 32. Схема четырехкристального двухзвенного фильтра.

личным разном частот бесконечного затухания (фиг. 33,а и б).

Ширина полосы пропускания четырехкристального фильтра также определяется разном пластин в смежных плечах звеньев и не превышает 0,8% от резонансной частоты.



Фиг. 33 Характеристика затухания четырехкристального фильтра как результат графического перемножения характеристик звеньев

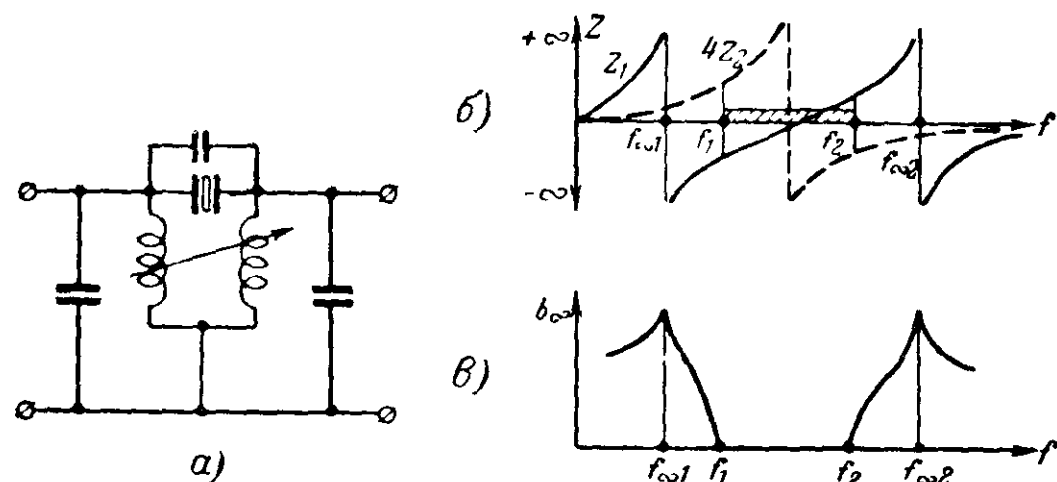
Фильтры с большим числом резонаторов в современных конструкциях почти не применяются.

Рассмотренные выше схемы относятся к узкополосным. Как было отмечено, максимальная ширина узкополосных фильтров не превышает 0,8% от резонансной частоты. Во многих случаях, однако, требуется более широкая полоса пропускания, которую невозможно получить, применяя чисто кварцевые фильтры.



Для увеличения предельной ширины полосы пропускания последовательно или параллельно кварцевым резонаторам в любой из рассмотренных выше схем включаются «расширительные» катушки индуктивности. Мы уже отмечали, что присоединение к резонатору индуктивности расширяет интервал между последовательным и параллельным резонансами. Ясно, что увеличение интервала между резонансами приводит к соответствующему расширению полосы пропускания.

Фильтры, в которых используются «расширительные» индуктивности, называются широкополосными или комбинированными.



Фиг. 34. Схема, кривые реактивных сопротивлений плеч и характеристика затухания Т-образного мостового фильтра.

рсованными. По литературным данным, наибольшая ширина полосы однокристалльного комбинированного фильтра составляет приблизительно 9% от резонансной частоты. Максимальная ширина полосы двухкристалльного фильтра превышает 12% от частоты резонанса.

Налаживание комбинированных мостовых фильтров довольно сложно. Более прост в изготовлении и наладке так называемый Т-образный мостовой фильтр, также относящийся к разряду широкополосных. Схема этого фильтра, кривые реактивного сопротивления его плеч и характеристика затухания показаны на фиг. 34. Характеристика затухания Т-образного мостового фильтра эквивалентна кривой двухкристалльного фильтра с дифференциальным трансформатором, однако стабильность последней выше.

Хотя рассматриваемый фильтр и называют мостовым, но он относится не к мостовому, а к цепочечному типу. В чисто мостовом фильтре нагрузочные сопротивления не входят

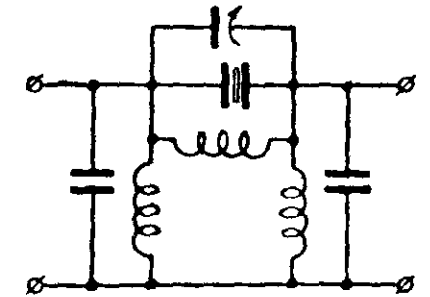
в плечи моста, а включаются в его диагонали. В данном же фильтре сопротивления нагрузки входят непосредственно в плечи моста.

Рассматриваемый фильтр состоит из двух связанных контуров. Связь этих контуров осуществляется тремя путями: через кварцевый резонатор, через емкость, шунтирующую кварц (эта емкость состоит из статической емкости резонатора и емкости подстроечного конденсатора, подключенного параллельно кварцу), и, наконец, через индуктивность (посредством взаимной индукции).

Когда коэффициент емкостной связи по своей абсолютной величине равен коэффициенту индуктивной связи, индуктивная связь уравнивается емкостной, и связь между контурами осуществляется только через пьезоэлектрическую ветвь кварца. При этом характеристика затухания фильтра симметрична.

Достоинством Т-образного фильтра является возможность регулировки ширины полосы пропускания путем расстройки контуров или их шунтирования переменным сопротивлением, чего нельзя сделать в двухкристалльном фильтре с дифференциальным трансформатором.

На фиг. 35 дана другая схема широкополосного цепочечного фильтра. Принцип действия, кривые реактивного сопротивления плеч и характеристика затухания этого фильтра такие же, как и в предыдущем случае.



Фиг. 35. Вариант схемы широкополосного цепочечного фильтра.

## КОНСТРУИРОВАНИЕ КВАРЦЕВЫХ ФИЛЬТРОВ

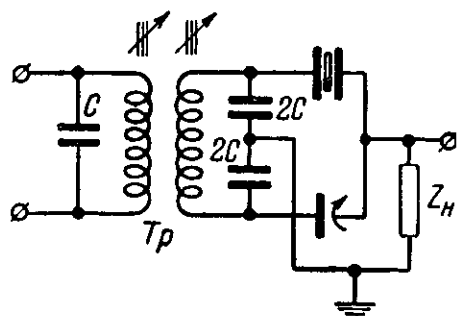
Конструирование фильтра является одним из важнейших этапов его разработки. Неудовлетворительное конструктивное оформление, как правило, влечет за собой ухудшение характеристики затухания, понижение стабильности резонансной частоты полосы пропускания, а также затрудняет наладку схемы.

В радиоприемниках для коротковолновой связи обычно применяются узкополосные кварцевые фильтры мостового типа. Рассмотрим в первую очередь два варианта конструктивного оформления таких фильтров.

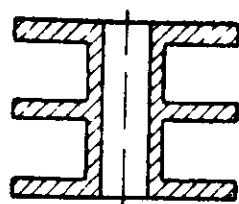
**1 й вариант.** В качестве дифференциального трансформатора используется готовый трансформатор промежуточной

частоты. Вторичная обмотка в таком трансформаторе не имеет средней точки и последняя создается искусственно посредством емкостного делителя (фиг. 36). Связь между контурами в типовом трансформаторе промежуточной частоты сравнительно слабая, поэтому оба контура должны быть настроены в резонанс.

**2-й вариант.** Изготавливается специальный дифференциальный трансформатор. Намотка катушек может быть сотовой или типа «Универсаль», а также многослойной, виток к витку. В последнем случае секции дифференциального трансформатора наматываются на каркасе, разрез которого пока-



Фиг. 36 Использование стандартного трансформатора промежуточной частоты в узкополосном мостовом фильтре.



Фиг. 37. Разрез каркаса дифференциального трансформатора.

зан на фиг. 37. Как первичная обмотка, так и обе секции вторичной размещаются поровну в обеих секциях каркаса так, чтобы под каждой секцией вторичной обмотки помещалась половина первичной. Вторичная обмотка отделяется от первичной электрическим экраном — однослойной обмоткой из провода диаметром 0,3—0,5 мм или из литцентрата, один конец которой надежно изолирован, а другой соединен со средней точкой вторичной обмотки. Электростатический экран может быть также изготовлен в виде незамкнутого кольца из медной фольги. Экран предназначен устранять емкостную связь между обмотками трансформатора (напряжения, наводимые на концах вторичной обмотки за счет емкостной связи, синфазны; соответствующие токи, протекая через статическую емкость кварца и емкость фазирующего конденсатора, не уравниваются друг друга, а, наоборот, складываются, вследствие чего на выходе фильтра возникает некоторое паразитное напряжение и его затухание в полосе задерживания понижается). При отсутствии электростатического экрана точки бесконечного затухания получаются расплывчатыми и в них существует остаточное на-

пряжение, которое тем больше, чем сильнее емкостная связь между обмотками. На низких частотах (порядка 150 кГц и ниже) необходимость в электростатическом экране отпадает, так как емкостная проводимость на этих частотах невелика.

В указанной конструкции дифференциального трансформатора индуктивная связь между обмотками весьма сильна, поэтому достаточно настроить лишь одну из обмоток (чаще всего настраивают вторичную обмотку).

Соотношение чисел витков обмоток обычно подбирается экспериментально. Величина емкости контура выбирается достаточно большой, для того чтобы изменение внешней емкости (например, входной емкости лампы или емкости монтажа) вызывало возможно меньшую его расстройку. Желательно также применение температурной компенсации с помощью конденсаторов с отрицательным температурным коэффициентом емкости. Впрочем, в фильтрах с регулируемой шириной полосы пропускания вопросы стабильности отходят на второй план и в этом случае при выборе параметров контура руководствуются соображениями получения максимального усиления. При этом коэффициент трансформации дифференциального трансформатора берется порядка 1:3 и более, а емкость контура выбирается минимальной.

Кварцевые фильтры рекомендуется тщательно экранировать от внешних полей; в двухзвенных фильтрах каждое звено монтируется в отдельном экране. Не должно быть индуктивной или емкостной связи между дифференциальными трансформаторами разных звеньев, между трансформатором и нагрузочным контуром и т. п. Катушки фильтра следует монтировать таким образом, чтобы их оси были взаимно перпендикулярны. Расширительные индуктивности в комбинированных мостовых фильтрах необходимо помещать в отдельные экраны.

Больше всего подходит для экранов листовая латунь. Можно также использовать алюминий. Применение стали нежелательно, так как в этом случае может наблюдаться магнитная связь между катушками, снижающая затухание фильтра в полосе непропускания. Это явление проявляется особенно заметно на частотах ниже 200 кГц.

Чтобы упростить налаживание фильтра и устранить возможность паразитных связей между его секциями, последние нередко разделяют лампой, т. е. вместо одного сложного фильтра применяют два простых, находящихся в различных ступенях усилительного тракта. Так, вместо двухкристал-

ного фильтра можно использовать два однокристалльных с одинаковыми резонансными частотами и полосами пропускания. Соответствующей расстановкой частот бесконечного затухания однокристалльных фильтров нетрудно получить результирующую кривую, вполне аналогичную характеристике двухкристалльного фильтра.

Использование двух однокристалльных фильтров вместо одного двухкристалльного позволяет регулировать полосу пропускания.

Кварцевый фильтр можно включать в любую ступень усилителя промежуточной частоты супергетеродинного приемника. Обычно фильтр включают в анодную цепь преобразовательной лампы; при таком включении помехи отсеиваются уже на входе усилителя промежуточной частоты и не перегружают его ламп.

Мы не останавливаемся на вопросах конструирования широкополосных цепочечных фильтров, так как эти фильтры могут быть легко изготовлены на базе обычных трансформаторов промежуточной частоты.

### НАЛАЖИВАНИЕ КВАРЦЕВЫХ ФИЛЬТРОВ

Для налаживания кварцевых фильтров необходимы стандарт-сигнал-генератор и катодный вольтметр. Для точного воспроизведения характеристики затухания и подгонки частот фильтровых кварцев требуется более сложная измерительная аппаратура (см. гл. 4).

Рекомендуется настраивать фильтр непосредственно в той усилительной схеме, в которой он предназначен работать, так как изменение внешних нагрузочных сопротивлений (внутреннего сопротивления лампы, сопротивления промежутка сетка — катод и т. д.) приводит к соответствующему изменению характеристики затухания, т. е. к расстройке фильтра.

Налаживание начинают с настройки дифференциальных трансформаторов. При этом кварцевые резонаторы должны быть выключены из схемы. Катодный вольтметр подключают к выходу фильтра. Если фильтр двухзвенный, вольтметр подключается к выходу первого звена. Если фильтр однокристалльный, фазирующий конденсатор устанавливается на максимум емкости; в случае двухкристалльного фильтра (звена) фазирующие конденсаторы ставятся в противоположные положения (иначе емкостные токи, протекающие

через них, могут оказаться равными по величине и в силу своей противофазности уравновесить друг друга).

Катодный вольтметр может также подключаться параллельно вторичной обмотке дифференциального трансформатора, однако при таком включении зажим «Земля» вольтметра окажется под некоторым потенциалом относительно нулевого провода схемы, и показания прибора будут неустойчивы.

Настройка дифференциального трансформатора ведется по максимуму показаний катодного вольтметра. Катодный вольтметр рекомендуется подключать через конденсатор емкостью 3—5 *пф* во избежание расстройки трансформатора после отключения прибора.

После окончания настройки дифференциального трансформатора первого звена в двухзвенном фильтре вольтметр подключают к выходу фильтра и настраивают трансформатор второго звена.

Закончив настройку дифференциальных трансформаторов, ставят на свои места кварцы и устанавливают фазирующие конденсаторы в средние положения.

Налаживание однокристалльных фильтров мостовой структуры затруднений обычно не вызывает. После того как трансформатор настроен, остается лишь подобрать нагрузочные сопротивления, установить необходимые пределы регулировки полосы пропускания, отсимметризовать характеристику затухания с помощью фазирующего конденсатора или, если ручка последнего выведена на переднюю панель приемника, проверить действие фазировки.

Налаживание двухкристалльных и четырехкристалльных фильтров гораздо сложнее. Прежде всего необходимо установить требуемый разнос частот кварцевых резонаторов, который, как уже указывалось, определяется потребной полосой пропускания. Ориентировочно разница в частотах кварцев составляет 0,8 ширины полосы. Установленные на выбранные частоты пластины включают в фильтр с заранее настроенным дифференциальным трансформатором. Правильность настройки трансформатора в двухкристалльном фильтре проверяется по форме верхушки резонансной кривой. Если трансформатор настроен не точно на резонансную частоту фильтра, верхушка резонансной кривой имеет глубокий провал, который уменьшается по мере приближения к резонансу.

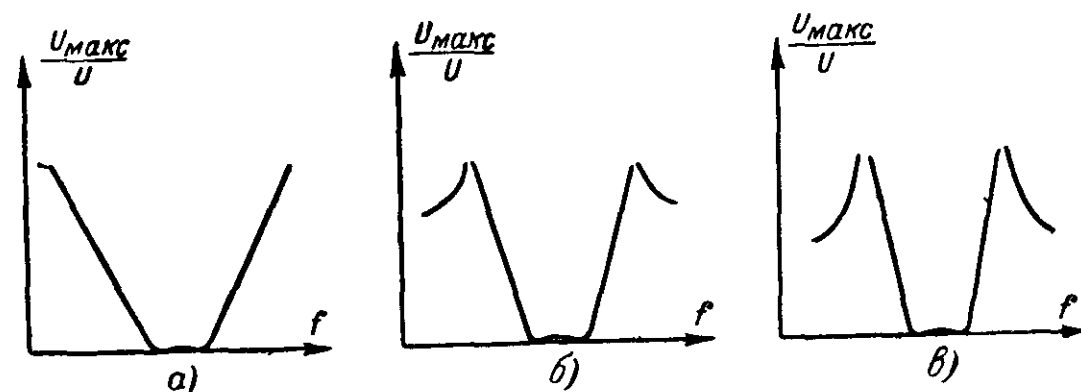
Если после настройки трансформатора верхушка резонансной кривой приобретает закругленную форму, — добротность катушек трансформатора слишком велика, и параллельно одной из обмоток следует подключить шунт. Сопротивление шунта подбирается так, чтобы верхушка кривой стала плоской с провалом до уровня 0,9—0,95. Если при настройке дифференциального трансформатора провал остается слишком большим, — добротность катушек мала, и ее следует увеличить. Увеличение добротности достигается применением литцендрата для намотки трансформатора, карбоновых и альсиферовых «горшочков» или сердечников и т. п.

Глубокий провал верхушки резонансной кривой наблюдается также при слишком большом разnose частот кварцевых резонаторов. В этом случае рекомендуется увеличивать коэффициент трансформации дифференциального трансформатора до величины порядка 1 : 3, а если эта мера наряду с повышением добротности окажется недостаточной, следует применять расширительные индуктивности. Заметим, однако, что провал верхушки до уровня 0,7 и выше не является существенным недостатком характеристики затухания.

Подстроив дифференциальный трансформатор по минимуму провала верхушки резонансной кривой фильтра, приступают к установке частот бесконечного затухания. Правильно настроенный двухкристальный фильтр имеет две частоты бесконечного затухания. Они получаются в том случае, когда статическая емкость более высокого по частоте кварца превышает статическую емкость более низкочастотного. При равенстве статических емкостей резонансная кривая получается очень пологой (теоретически точки бесконечного затухания бесконечно удалены друг от друга). По мере того как статическая емкость более высокого по частоте кварца увеличивается (это достигается увеличением емкости подключенного параллельно ему фазирующего конденсатора), крутизна скатов характеристики возрастает, частоты бесконечного затухания сближаются, и затухание в полосе задерживания уменьшается. Та же картина наблюдается и при уменьшении статической емкости более низкого по частоте кварца.

На фиг. 38, а приведена кривая фильтра с равными статическими емкостями кварцевых резонаторов и показано, как изменяется эта кривая при увеличении емкости более высокочастотного (уменьшении более низкочастотного) кварца (фиг. 38, б и в). Таким образом, разнос частот бесконечного

затухания определяет не только крутизну скатов кривой, но и величину ее «хвостов». Чем круче скаты резонансной кривой, тем выше «хвосты». Обычно принимают компромиссное решение: задаются максимально допустимым уровнем «хвостов» и довольствуются той крутизной скатов, которая получается при этом уровне. В фильтрах, предназначенных для коротковолновой любительской радиосвязи, уровень «хвостов» не должен быть выше 0,05.



Фиг. 38. Зависимость формы резонансной кривой двухкристального фильтра от соотношения емкостей фазирующих конденсаторов.

Следует отметить, что крутизна скатов при одном и том же уровне напряжения в полосе задерживания может быть различна. Она зависит от величины провала верхушки резонансной кривой, т. е. от настройки трансформатора, добротности его обмоток, а также от коэффициента трансформации и величины нагрузочного сопротивления. Крутизна скатов повышается с углублением провала, однако, как было уже сказано, наиболее выгодный уровень провала составляет 0,9—0,95. Провал с уровнем ниже 0,7 недопустим, так как подобная неравномерность затухания в полосе пропускания фильтра будет заметна при слуховом приеме.

Установив заданный уровень «хвостов», корректируют ширину полосы пропускания фильтра. Поскольку в любительских условиях подгонка частоты кварцев затруднительна, к ней следует прибегать возможно реже. В небольших пределах ширину полосы можно изменять с помощью фазирующих конденсаторов. Выше мы показали, что увеличение емкости, подключенной параллельно кварцу, сужает промежуток между его последовательным и параллельным резонансами. При этом сужается и полоса пропускания фильтра.

Практически настраивают стандарт-сигнал-генератор на максимум одного из «хвостов» и увеличивают (или умень-

шают) емкости обеих фазирующих конденсаторов так, чтобы величина «хвоста» оставалась прежней. Одновременное увеличение емкости фазирующих конденсаторов вызывает сужение полосы пропускания и, наоборот, уменьшение их емкости расширяет ее.

Не следует забывать, что всякий раз после перестройки фазирующих конденсаторов нужно проверить форму верхушки резонансной кривой и подстроить дифференциальный трансформатор.

В заключение обычно снимают по точкам характеристику затухания. С этой целью стандарт-сигнал-генератор настраивают последовательно на ряд частот, соответствующих различным уровням резонансной кривой. Эти частоты откладываются по горизонтальной оси характеристики затухания. На каждой из них измеряется выходное напряжение фильтра (при этом входное напряжение, т. е. напряжение, снимаемое со стандарт-сигнал-генератора, должно оставаться постоянным). По вертикальной оси откладываются отношения максимального напряжения на выходе фильтра к текущему, т. е. к напряжению в каждой данной точке. При этом следует остерегаться ограничения амплитуды за счет нелинейности ламповых характеристик усилителя. Лампы усилителя должны работать на линейных участках своих характеристик, в противном случае характеристика затухания будет искажена. Проверка усилителя на отсутствие нелинейных искажений производится общеизвестным способом путем снятия амплитудной характеристики (взаимной зависимости напряжений на выходе и входе усилителя при неизменной частоте). В пределах прямолинейного участка этой характеристики ограничение отсутствует.

Существует другой способ снятия характеристики затухания фильтра, более громоздкий по сравнению с предыдущим, но зато обеспечивающий отсутствие нелинейных искажений. Этот способ состоит в следующем.

Как и в предыдущем случае, генератор настраивается на ряд частот в пределах характеристики, но на этот раз поддерживается постоянство напряжения на выходе фильтра, что достигается изменением напряжения, снимаемого с генератора. Напряжение на выходе фильтра должно быть невелико (порядка 0,5—1 в). Напряжение стандарт-сигнал-генератора отсчитывается по шкале аттенюатора и выражается в мкв. По вертикальной оси характеристики затухания откладываются отношения текущего значения напряже-

ния, снимаемого с генератора, к минимальному значению этого напряжения. При малых величинах «хвостов» по вертикальной оси откладываются логарифмы этих отношений.

В тех случаях, когда крутизна скатов характеристики затухания недостаточна, применяют четырехкристальные фильтры. Налаживание таких фильтров является весьма кропотливым делом и доступно лишь наиболее квалифицированным радиолюбителям.

Как было отмечено выше, характеристика затухания четырехкристального фильтра может быть представлена как результат графического перемножения характеристик, входящих в схему двухкристальных звеньев, идентичных по резонансной частоте и ширине полосы пропускания, но различных по разнесу точек бесконечного затухания.

Звенья четырехкристального фильтра проще всего настраивать по отдельности как обычные двухкристальные фильтры. В качестве исходной точки можно избрать разнес частот бесконечного затухания в 2,5 полосы по уровню 0,7 в одном из звеньев и порядка 4 полос в другом.

В этом случае при отсутствии паразитных связей между звеньями соединение последних в четырехкристальный фильтр дает, как правило, характеристику затухания с четырьмя «хвостами» (фиг. 33,а). Следует только следить за тем, чтобы частоты пластин, стоящих в одноименных плечах первого и второго звеньев, были достаточно близки. Точность их настройки в резонанс должна быть такова, чтобы разница в частотах не превышала 10—20 гц при ширине полосы пропускания порядка 200 гц.

Настроив каждое из звеньев, соединяют их вместе и просматривают резонансную кривую четырехкристального фильтра. Дальнейшая настройка заключается в подгонке сопротивлений шунтов, корректировке верхушки резонансной кривой и выравнивании «хвостов». Шунты, как и в случае двухкристального фильтра, подбираются так, чтобы резонансная кривая при правильной настройке дифференциальных трансформаторов имела плоскую верхушку с провалом до уровня 0,9—0,95 (в крайнем случае допустим провал до уровня 0,7).

Генератор стандартных сигналов настраивают на минимум провала резонансной кривой и поочередной подстройкой дифференциальных трансформаторов в каждом звене «поднимают» провал до указанного уровня.



Для выравнивания «хвостов» необходимо записать их напряжения, затем вновь разбить фильтр на два звена и подстройкой соответствующего фазирующего конденсатора опустить «хвосты», если они велики, или поднять их при желании повысить крутизну скатов характеристики затухания. При этом следует помнить, что уменьшение «хвостов» в одном из звеньев автоматически увеличивает «хвосты» другого звена во время их совместной работы.

Следует заметить, что настройка четырехкристального фильтра требует неоднократного расчленения фильтра на звенья и обратного их соединения.

Существуют иные, более совершенные способы настройки четырехкристальных фильтров, однако эти способы мало пригодны для радиолюбителей вследствие большей сложности.

При правильной установке «хвостов» по крайней мере три из них должны равняться по величине. Уровень «хвостов» в четырехкристальном фильтре должен быть не выше 0,01 от максимума резонансной кривой.

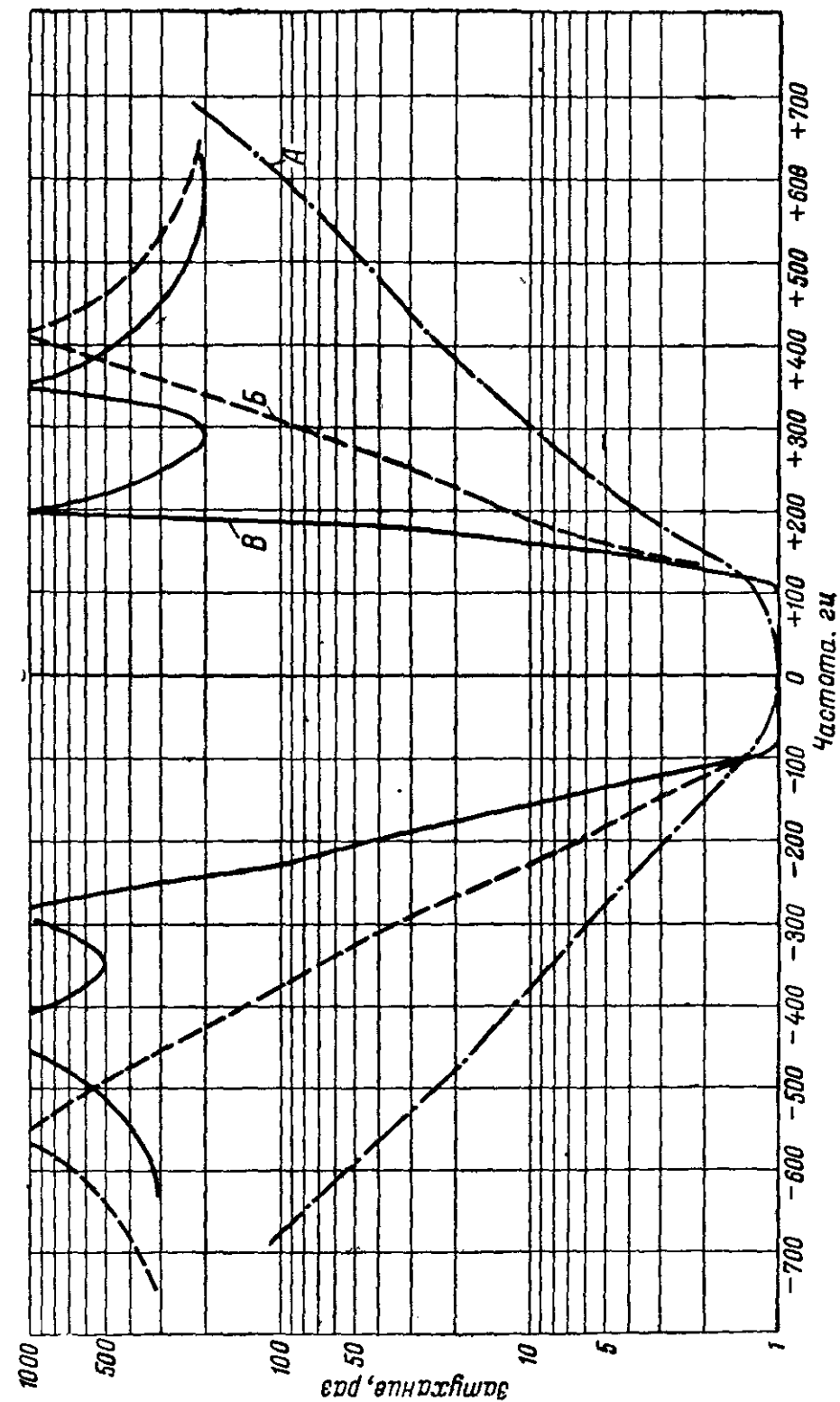
На фиг. 39 показаны для сравнения реальные характеристики затухания однокристалльного (А), двухкристального (Б) и четырехкристального (В) фильтров.

Несколько иной характер носит налаживание Т-образного фильтра, схема которого была приведена на фиг. 34. Мы уже указывали, что условием симметричности характеристики затухания такого фильтра является равенство коэффициентов индуктивной и емкостной связи между его входными и выходными контурами. В этом случае связь между контурами осуществляется только через последовательный (пьезоэлектрический) контур кварца.

Налаживание фильтра ведется в следующей последовательности:

1. Контур настраивают на частоту кварца. Это может быть сделано с помощью стандарт-сигнал-генератора или вспомогательного кварцевого генератора, собранного на том же кварце, временно выключенном из схемы фильтра.

2. Кварц тормозят, касаясь плоскости пластины куском резинки, или заменяют его конденсатором, емкость которого равна статической емкости данного резонатора (последнюю можно замерить обычными способами). Затем, сближая или раздвигая катушки контуров, добиваются отсутствия напряжения на выходе фильтра, что свидетельствует о равенстве индуктивной и емкостной связи.



Фиг. 39. Реальные характеристики затухания однокристалльного А, двухкристального Б и четырехкристального В фильтров.

3. Вращением подстроечного конденсатора, подключенного параллельно кварцу, устанавливают желаемый разнос частот бесконечного затухания при незаторможенном кварце, затем вновь тормозят пластину и снова подгоняют величину индуктивной связи.

4. Корректируют настройку контуров, от которой зависит ширина полосы пропускания фильтра.

# ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

## ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ КВАРЦА В ЛЮБИТЕЛЬСКИХ УСЛОВИЯХ

Резонансную частоту кварцевой пластины в простейшем случае можно ориентировочно определить с помощью генератора стандартных сигналов типа ГСС-6 или ему подобных.

С этой целью кварцевый резонатор подключают к выходу «1в» генератора ГСС-6 и, медленно вращая ручку настройки, наблюдают за показаниями индикатора выходного напряжения.

На частотах, отличных от резонансной, сопротивление кварца очень велико, и потребляемая им мощность ничтожно мала. На частоте последовательного резонанса сопротивление пластины резко падает, вследствие чего возрастает мощность, потребляемая нагрузкой генератора, и его выходное напряжение заметно понижается. Практически на частоте последовательного резонанса в показаниях индикатора наблюдается провал, который можно обнаружить при достаточно медленном вращении ручки настройки.

Глубина спада выходного напряжения при настройке в резонанс тем больше, чем меньше его активное сопротивление.

Провал в показаниях индикатора наблюдается и на гармониках резонансной частоты кварца, однако провал этот неглубок и гораздо меньше бросается в глаза по сравнению с провалом на основной частоте. Кроме того, всегда можно установить порядок резонансной частоты, зная вид колебаний (последний легко установить, исходя из конструктивных особенностей резонатора) и толщину или длину пластины.

Точность указанного способа измерения частоты кварцев невелика и определяется главным образом погрешностью в градуировке генератора стандартных сигналов, однако в любительской практике и такая точность часто оказывается достаточной.

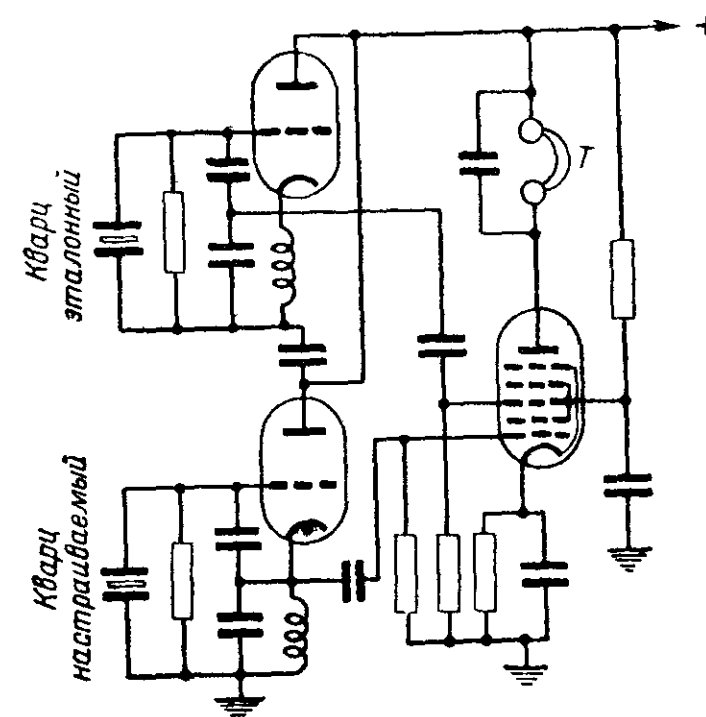
Заметим, что указанным способом можно измерять частоты не только кварцевых резонаторов, но и обычных последовательных колебательных контуров.

Если в распоряжении радиолюбителя имеется несколько близких по частоте кварцев, которые необходимо настроить

в резонанс с точностью до нескольких герц, можно воспользоваться простейшим прибором, принципиальная схема которого показана на фиг. 77.

Этот прибор представляет собой простейший гетеродинный частотомер. Он может быть легко изготовлен в домашних условиях и не требует какой-либо градуировки.

Прибор состоит из трех ламповых ступеней. Две из них собраны по широкодиапазонным генераторным схемам,



Фиг. 77. Простейшая схема гетеродинного частотомера.

третья выполняет функции смесителя. В ее анодную цепь включены телефонные трубки Т. Сравнимые пластины генерируют частоты, различные, но достаточно близкие друг к другу. Предварительная настройка по генератору стандартных сигналов обеспечивает такую точность, при которой разница в частотах не превышает звуковой частоты. Поэтому в результате гетеродирования генерируемых частот, подаваемых с анодов генераторных ламп на сетку смесительной лампы, в анодной нагрузке смесителя выделяются колебания звуковой частоты  $F = f_1 - f_2$ , где  $f_1$  и  $f_2$  — частоты сравниваемых кварцев. По высоте прослушиваемого в телефонной трубке звука судят о разнице в частотах.

Для того чтобы определить, какой кварц выше по частоте, параллельно одному из резонаторов подключают емкость порядка 10—100 пф. Если после подключения емко-

сти звуковой тон станет ниже, частота данного кварца превышает частоту второго резонатора, если же подключение емкости вызовет повышение тона, частота кварца, параллельно которому подключалась емкость, ниже частоты второй пластины.

Постепенно изменяя частоту одного из кварцев, подгоняют частоты пластин в резонанс. В момент резонанса звук в телефонных трубках отсутствует или же прослушиваются прерывистые «нулевые» биения с частотой не выше 1—2 периодов в секунду (в этом случае разница в частотах пластин составляет 1—2 гц, что допустимо).

В промышленных образцах подобного прибора вместо телефонных трубок используются стрелочные частотомеры, позволяющие настраивать пластины не только в резонанс, но и с некоторой, заранее заданной разницей в частотах. Однако подобные приборы более сложны в изготовлении и налаживании (шкалу частотомера необходимо градуировать по эталонному звуковому генератору), и поскольку область их применения весьма узка, они не могут быть рекомендованы для самостоятельного изготовления.

Необходимость в настройке пластин с некоторым разносом частот обычно возникает при разработке двухкристальных и четырехкристальных фильтров, причем величина этого разноса определяет ширину полосы пропускания фильтра. В радиолюбительской практике обычно нет необходимости в точной установке ширины полосы пропускания. Так, например, в приемниках для приема любительских коротковолновых радиостанций, работающих телеграфом, полоса выбирается в пределах 150—300 гц и ее порядок может быть определен с помощью стандарт-сигнал-генератора.

Приборы для более точного измерения частоты не только кварцевых генераторов, но и любых иных источников колебаний описываются ниже.

## ПРИБОРЫ ДЛЯ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ КОЛЕБАНИЙ

В некоторых случаях оказывается необходимым измерить частоту колебаний с большей точностью, чем та точность, которую обеспечивает стандарт-сигнал-генератор. Такая потребность может возникнуть при настройке кварцев на какие-либо конкретные частоты любительских диапазонов, градуировке задающих генераторов, измерительной аппаратуры и т. п.

Частота колебаний может быть измерена с достаточной точностью методом вторичных биений. Этот метод состоит в следующем. Измеряемая частота  $f_x$  смешивается с известной частотой  $f_s$  эталонного кварцевого генератора. Последняя выбирается такой, чтобы разностная частота не превышала 20—30 кГц. Эта разностная частота

$$F_x = f_s - f_x,$$

снимаемая с нагрузки смесительной лампы, в свою очередь, смешивается с частотой звукового генератора. В анодной нагрузке второго смесителя выделяются колебания с частотой

$$F = F_s - F_x,$$

где  $F_x$  — разностная частота, полученная в результате смешения измеряемой и эталонной частот;

$F_s$  — частота звукового генератора.

Вторичные биения с частотой  $F$  прослушиваются в телефонных трубках, включенных в анодную цепь второго смесителя. Изменяя настройку звукового генератора, можно менять тон биений.

Практически, звуковой генератор настраивают на „нулевые“ биения ( $F_s = F_x$ ) и фиксируют показания его шкалы. Тогда измеряемая частота находится как сумма (или разность) эталонной частоты и частоты звукового генератора.

Таким образом, остается выяснить знак звуковой частоты. Для этого незначительно понижают измеряемую частоту (если последняя генерируется кварцевым генератором, параллельно кварцу подключают емкость порядка 10—100 пф). После понижения измеряемой частоты вновь настраивают звуковой генератор на „нулевые“ биения. Если при этом частота звукового генератора  $F_s = F_x$  также понизится — измеряемая частота выше эталонной, если же звуковая частота после понижения измеряемой частоты станет выше, — искомая частота ниже эталонной.

В первом случае

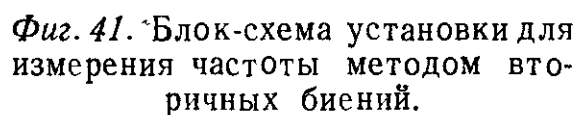
$$f_x = f_s + F_s,$$

а во втором

$$f_x = f_s - F_s.$$

Блок-схема установки для измерения частоты методом вторичных биений приведена на фиг. 41.

Более удобны в эксплуатации так называемые гетеродинные волномеры с кварцевым контролем. На частотах порядка 100—500 кГц погрешность подобных приборов при правильной градуировке не превышает 3—5 гц.



ным прибором, подразделяется на два поддиапазона: от 125 до 2 000 кГц и от 2 000 до 20 000 кГц.

Гетеродинный волномер содержит 3 лампы. Генератор с плавной настройкой собран по трехсеточной схеме с электронной связью на лампе 6Ж8. Он перекрывает частоты от 125 до 250 *кГц* и от 2 000 до 4 000 *кГц*. При работе прибора в режиме стандарт-сигнал-генератора на защитную сетку лампы 6Ж8 подается модулирующее напряжение. Преобразователь частоты с отдельным кварцованным гетеродином собран на лампе 6А8. Частота кварца равна 1 000 *кГц* (подгоняется посредством подстроечного конденсатора *C*). Гетеродин преобразователя собран по схеме с включением резонатора между катодом и сеткой. Усилитель звуковой частоты (режим гетеродинного волномера) или модулятор (режим стандарт-сигнал-генератора) собран на лампе 6С2С. В схеме модулятора лампа 6С2С работает как звуковой генератор с индуктивной обратной связью.

80

[illegible]

Фиг. 42. Схема универсального гетеродинного волномера.

ленными гармониками измеряемой частоты и гармониками генератора. Поэтому гетеродинный волномер дает хорошие результаты лишь при *точном* измерении частоты, когда известно ее ориентировочное значение (приближенное значение частоты можно установить с помощью резонансного волномера или расчетным путем). При работе в режиме стандарт-сигнал-генератора прибор имеет также существенные недостатки. К их числу можно отнести отсутствие измерителя выходного напряжения и градуированного делителя, а также малую величину выходного напряжения на гармониках и большой коэффициент нелинейных искажений.

Однако указанные недостатки прибора компенсируются его сравнительной простотой и универсальностью при высокой точности измерения.

В процессе эксплуатации настройка прибора корректируется с помощью кварцевого генератора (лампа 6А8), гар-

моники и субгармоники которого образуют густую сетку «опорных» точек, отмечаемых при градуировке прибора на градуировочной кривой (или в таблице).

Перед началом измерений переключатель  $P_2$  кварцевого генератора ставится в положение 1 (включено). При этом вход гетеродинного волномера (выход стандарт-сигнал-генератора) отключается от сигнальной сетки преобразовательной лампы и замыкается накоротко. Одновременно с этим подается напряжение на анод кварцевого генератора.

Гармоники последнего, интерферируя с основной частотой и гармониками генератора с плавной настройкой (лампа 6Ж8), дают биения, которые прослушиваются в телефонных трубках при надлежащей настройке генератора.

Если необходимо определить точное значение какой-либо частоты, предварительно замеренной с меньшей точностью, устанавливают верньер настройки генератора на ближайшую опорную точку (которая находится по градуировочной кривой или в таблице) и поворачивают конденсатор коррекции  $C_n$  в положение, соответствующее нулевым биениям.

Скорректировав частоту генератора с плавной настройкой, переводят переключатель  $P_2$  кварцевого генератора в положение 2 (выключено) и приступают к измерению.

Если прибор используется как гетеродинный волномер, то переключатель  $P_3$  (модуляция) ставится в положение 2 (выключено). При этом, как уже указывалось, выходная лампа 6С2С работает как усилитель звуковой частоты.

При длительном пользовании прибором следует периодически (через каждые 10—15 мин.) корректировать его показания по кварцевой опорной точке. После двух-трехчасового самопрогрева генератора необходимость в частой проверке отпадает.

При использовании прибора в качестве стандарт-сигнал-генератора его выход (вход гетеродинного волномера) соединяют с антенным зажимом настраиваемого приемника. Установив с помощью градуировочной таблицы желаемое значение частоты стандарт-сигнал-генератора и скорректировав его настройку по ближайшей опорной точке, переводят переключатель  $P_3$  (модуляция) в положение 1 (включено). При этом лампа 6С2С начинает работать как генератор звуковой частоты (модулятор). Телефонные трубки переключают на выход настраиваемого приемника, после чего последний настраивают по максимуму звука. Лучшие результаты дает применение стрелочных индикаторов.

Настройка ступеней приемника ведется обычными способами, на описании которых мы останавливаться не будем.

При желании проверить настройку генератора по кварцу телефонные трубки вновь включают на выход прибора, переключатель  $P_3$  ставят в положение 2 (выключено), а переключатель  $P_2$  (кварц) — в положение 1 (включено).

При настройке телеграфных приемников или узкополосных кварцевых фильтров модуляция выключается, и стандарт-сигнал-генератор генерирует незатухающие колебания. Настраивать кварцевые фильтры при включенной модуляции нельзя, так как в этом случае по обе стороны от резонансной кривой появляются ложные пики, соответствующие настройке на боковые частоты.

В заключение заметим, что при самостоятельном изготовлении описанного прибора следует обратить самое серьезное внимание на механическую прочность деталей и качество верньерного механизма. Точность показаний и количество точек на градуировочной кривой или в таблице определяются замедлением верньера и величиной люфта, который необходимо свести к минимуму. Рекомендуемое замедление верньера порядка 1 : 300.

## ОБРАЗЦОВЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ И ЭТАЛОНЫ ЧАСТОТЫ

Для прецизионного (особо точного) измерения частоты применяются особые образцовые меры или эталоны. Современный образцовый генератор обладает чрезвычайно высокой стабильностью частоты. Минутное изменение частоты такого генератора не превышает  $1 - 5 \times 10^{-8} \%$  от номинала, в течение дня частота изменяется не более чем на  $1 - 5 \times 10^{-7} \%$ , а в течение месяца на  $1 - 5 \times 10^{-6} \%$ . Эталоны частоты проверяются и корректируются по сигналам точного времени или непосредственно астрономическими наблюдениями. Абсолютным эталоном служит земной шар, период обращения которого (сутки) равен 86 400 сек.

Высокая стабильность эталонов частоты стала достижимой благодаря использованию высокостабильных схем кварцевых генераторов, кварцев с большой добротностью и специальных термостатов, поддерживающих постоянство температуры резонатора (а иногда и генератора в целом) с точностью до тысячных градуса.

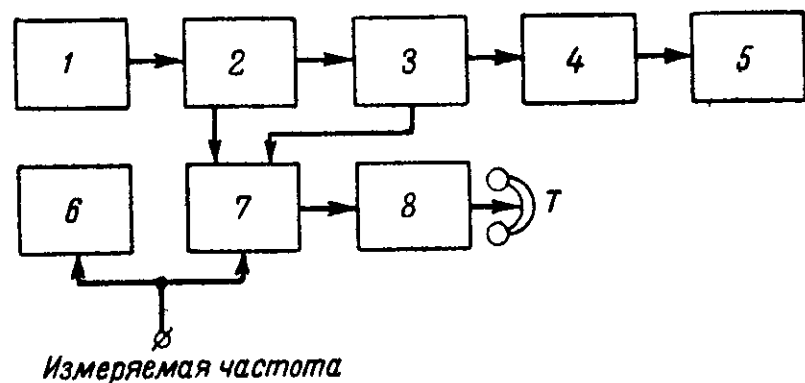
Современный эталон частоты представляет собой сложное и громоздкое устройство, однако упрощенный его ва-



риант может быть изготовлен и настроен квалифицированным радиолюбителем.

На фиг. 43 представлена скелетная схема эталона. Последний состоит из высокостабильного кварцевого генератора, делительных ступеней, регенеративного приемника, звукового генератора, гетеродинного волномера и так называемых синхронных часов.

Высокостабильный генератор генерирует частоту 50 или 100 кГц, которая затем делится посредством мульти-



Фиг. 43. Скелетная схема эталона частоты:

1 — эталонный кварцевый генератор; 2 — мультипликатор на 50 кГц; 3 — мультипликатор на 10 кГц; 4 — мультипликатор на 1 кГц; 5 — синхронные часы; 6 — гетеродинный волномер, 7 — регенеративный приемник; 8 — звуковой генератор.

вibrаторов, образуя частоты 50 кГц, 10 кГц и 1 кГц. Гармоники этих частот создают густую сетку опорных точек. Так, мультипликатор на 10 кГц образует спектр частот, каждая из которых отстоит от соседней на 10 кГц.

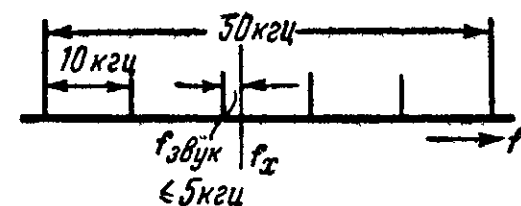
Предположим, что нам нужно определить точное значение какой-либо частоты. Установим предварительно ее приближенное значение. С этой целью подадим колебания искомой частоты на вход гетеродинного волномера. Зная порядок частоты, легко установить ее приближенное значение по нулевым биениям (принцип действия гетеродинного волномера был разобран нами выше).

Настроим регенеративный приемник на частоту, найденную с помощью гетеродинного волномера (для этого указатель настройки приемника устанавливается на соответствующее деление шкалы). Затем подадим колебания измеряемой частоты на вход приемника и введем обратную связь. При этом на выходе приемника будут прослушиваться биения звуковой частоты. Подстроим приемник так, чтобы тон биений был низок (порядка 50—200 гц), после чего

уменьшим обратную связь до срыва колебаний в регенеративном контуре и полного исчезновения звука на выходе приемника.

Подадим на вход приемника колебания с выхода мультипликатора на 10 кГц. В этом случае входная лампа приемника будет выполнять функции смесителя, смешивающего измеряемую частоту с соответствующей гармоникой мультипликатора. Вследствие того, что интервал между соседними гармониками мультипликатора равен 10 кГц, разностная частота будет меньше 5 кГц, т. е. может прослушиваться на выходе приемника в виде тона.

Звуковую частоту, полученную в результате смешения измеряемой частоты с гармоникой мультипликатора, крат-



Фиг. 44. Сетка опорных точек.

ной 10 кГц, в свою очередь, смешиваем с частотой стабильного звукового генератора (метод вторичных биений, рассмотренный нами выше). Настраиваем звуковой генератор на нулевые биения. Показания шкалы звукового генератора дают непосредственный отсчет разностной частоты, т. е. разности между измеряемой частотой и гармоникой мультипликатора. Остается определить знак этой разницы. Установить знак разностной звуковой частоты можно при помощи спектра гармоник кварцевого генератора (если частота последнего равна 50 кГц) или мультипликатора на 50 кГц. Прослушивая биения измеряемой частоты с гармониками мультипликаторов на 10 и 50 кГц, сравнительно просто определить положение искомой частоты относительно сетки опорных точек (фиг. 44).

Проверить знак разностной звуковой частоты можно также путем незначительного повышения или понижения измеряемой частоты. Если при изменении измеряемой частоты звуковая частота изменяется в ту же сторону, то знак разностной частоты положителен, и ее величину нужно прибавить к значению частоты соответствующей гармоники. Если же при изменении измеряемой частоты звуковая частота отклоняется в обратную сторону, то ее знак отрицателен, и показание звукового генератора следует вычесть из значения гармоники мультипликатора.

Частота гармоники мультипликатора определяется по шкале приемника. Пусть грубое значение измеряемой ча-

стоты, найденное по шкале приемника, равно 7 063 кГц. Тогда, очевидно, искомая частота находится между гармониками мультивибратора на 10 кГц с частотами 7 060 и 7 070 кГц. Допустим, далее, что величина разностной звуковой частоты равна 3 065 Гц, и ее знак положителен. Ясно, что точное значение измеряемой частоты равно сумме 7 060 000 Гц + 3 065 Гц, т. е. 7 063 065 Гц.

Если точность шкалы приемника недостаточна, частоту гармоники мультивибратора на 10 кГц можно проверить по гармонике мультивибратора на 50 кГц. Ближние к измеряемой частоте гармоники мультивибратора на 50 кГц имеют частоты 7 050 и 7 100 кГц. Между двумя опорными точками мультивибратора на 50 кГц укладывается четыре опорные точки, создаваемые мультивибратором на 10 кГц. Их частоты: 7 060, 7 070, 7 080 и 7 090 кГц. Зная частоту гармоники мультивибратора на 50 кГц (для ее определения не требуется высокой точности в градуировке шкалы приемника), легко определить частоты каждой из гармоник мультивибратора на 10 кГц.

Рассмотрим более подробно работу отдельных блоков, входящих в комплект стандарта частоты.

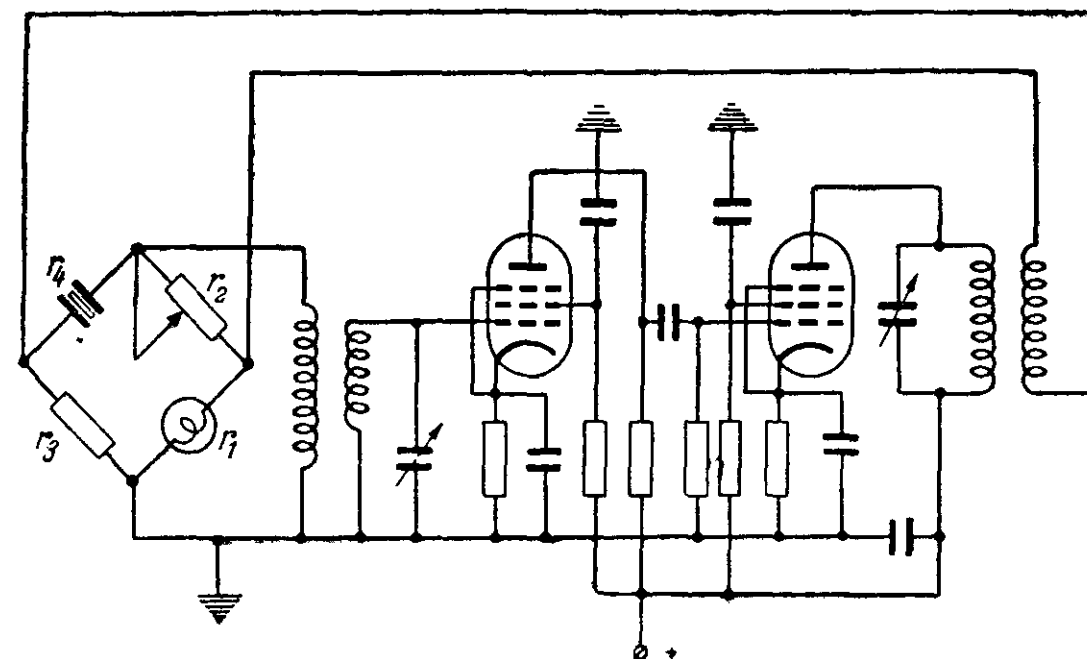
**Образцовый кварцевый генератор.** Кварцевый генератор эталона частоты должен удовлетворять особо высоким требованиям в отношении стабильности. Конструкция образцового генератора, как правило, предусматривает все меры к устранению влияний дестабилизирующих факторов на частоту генерации, как то: термостаты и баростаты (устройства для поддержания постоянства температуры и давления), стабилизация питающих напряжений и т. п. Особое внимание обращается на кварцевый резонатор, который должен обладать малым температурным коэффициентом частоты, высокой добротностью и механической прочностью.

В современных эталонах частоты нередко используются высокостабильные кварцевые генераторы мостового типа. К достоинствам таких генераторов относится наличие автоматической регулировки выходного колебательного напряжения при измерении параметров, характеризующих режим генератора, (отклонениях напряжений питания, расстройке контуров, смене ламп и т. д.).

На фиг. 45 показана типичная мостовая схема генератора с кварцевой стабилизацией. Благодаря автоматической регулировке, осуществляемой посредством равновесного

моста, напряжение на выходе схемы во время ее работы остается постоянным, а отклонения частоты сопровождаются резкими изменениями сдвига фаз в цепи возбуждения, возвращающими частоту к первоначальному значению.

В мостовом генераторе одна из диагоналей моста связана со входом генератора, другая — с его выходом. Плечи моста образованы активными сопротивлениями  $r_2$  и  $r_3$ , лам-



Фиг. 45. Схема мостового генератора.

почкой с очень тонкой вольфрамовой нитью  $r_1$  (такая лампочка обладает большим положительным коэффициентом сопротивления, при накаливании нити ее сопротивление резко возрастает) и кварцевым резонатором  $r_4$ .

Как известно, баланс моста наступает в том случае, если выполняется равенство

$$r_1 \cdot r_4 = r_2 \cdot r_3.$$

В отличие от большинства разобранных ранее схем мостовой генератор работает на частоте, близкой к последовательному резонансу кварца. На резонансной частоте кварцевая пластина представляет собой чисто активное сопротивление, так как реактивная составляющая полного сопротивления кварцевого резонатора при последовательном резонансе обращается в нуль.

В момент баланса моста его затухание бесконечно велико, напряжение на выходной диагонали равно нулю и

генерация отсутствует. Для обеспечения устойчивых колебаний необходимо, чтобы коэффициент усиления усилителя (в схеме фиг. 45 усилитель двухламповый) несколько превышал затухание моста. Это условие может быть выполнено лишь при некоторой разбалансировке моста.

Величины сопротивлений  $r_2$  и  $r_3$  выбираются таким образом, чтобы в момент включения, когда нить лампочки  $r_1$  еще не успела накалиться, мост был далек от баланса и обладал малым затуханием. По мере нагрева нити колебательным током ее сопротивление, как известно, повышается, вследствие чего мост приближается к балансу и затухание возрастает. Рабочая точка моста устанавливается с помощью переменного сопротивления  $r_2$ .

Автоматическая регулировка амплитуды происходит следующим образом. Пусть по какой-либо причине увеличилось усиление усилителя и амплитуда выходного напряжения повысилась. Как следствие, неизбежно должны возрасти напряжение на входе моста и токи в его плечах. Увеличение тока, протекающего через нить лампочки накаливания, вызывает дополнительный нагрев нити, т. е. повышение ее сопротивления, что, как мы уже отмечали, смещает рабочую точку моста в сторону баланса. При этом затухание моста увеличивается, и напряжение на его выходе (а также и на выходе генератора) уменьшается.

При произвольном уменьшении выходного напряжения генератора токи в плечах моста падают, затухание снижается и амплитуда колебательного напряжения возвращается к первоначальной величине.

Таким образом, мост реагирует на любое изменение режима работы генератора, причем чувствительность автоматической регулировки тем выше, чем больше усиление схемы. Увеличение коэффициента усиления способствует повышению стабильности генерируемой частоты и, помимо того, позволяет снизить напряжение на кварцевом резонаторе до десятых долей вольта, т. е. создать наиболее благоприятные условия для работы пластины.

Мостовые схемы наиболее пригодны для частот ниже 300 кГц. На более высоких частотах работа генератора становится менее устойчивой вследствие увеличения емкостной проводимости кварца.

Как показал опыт, стабильность частоты мостовых генераторов весьма велика. При соответствующем конструктивном оформлении часовой уход генерируемой частоты не пре-

вышает  $1 \cdot 10^{-7}\%$ . Следует, однако, отметить, что налаживание мостовых генераторов и выбор оптимальной рабочей точки моста довольно сложны. Поэтому в любительских конструкциях эталонов частоты мостовая схема может быть заменена какой-либо иной, более простой в налаживании. Неплохие результаты дает генераторная схема, приведенная на фиг. 15.

Проверить правильность работы мостовой схемы можно с помощью катодного вольтметра, подключенного параллельно входу второй ступени усилителя. При правильной настройке моста после включения генератора стрелка прибора совершает несколько плавных качаний с постепенно уменьшающейся амплитудой, что свидетельствует о работе автоматической регулировки.

**Мультивибраторы.** Для деления частоты высокостабильного кварцевого генератора и создания сетки опорных точек используются мультивибраторы (специальные генераторные схемы, колебания которых отличны от синусоидальных и в силу этого обладают большим числом ярко выраженных гармоник). Особенностью мультивибраторов является то обстоятельство, что их колебания легко поддаются захватыванию. Если на мультивибратор воздействует внешнее колебательное напряжение с частотой, *приблизительно* равной или кратной собственной частоте мультивибратора, последняя изменяется и становится *в точности* равной или кратной частоте внешнего напряжения. Такое явление носит название *синхронизации*.

Сама по себе частота мультивибратора очень нестабильна, при наличии же синхронизации стабильность частоты колебаний мультивибратора равна стабильности синхронизирующего источника (в данном случае — высокостабильного кварцевого генератора). Таким образом, с помощью синхронизированного мультивибратора получается густая сетка опорных точек, каждая из которых обладает стабильностью эталонного генератора.

Деление частоты мультивибраторами обычно бывает ступенчатым. Так, например, частота генератора на 100 кГц, используется для синхронизации мультивибратора на 50 кГц, последняя, в свою очередь, синхронизирует мультивибратор на 10 кГц и т. д.

Рассмотрим более подробно работу типовой схемы мультивибратора, представленной на фиг. 46. Эта схема представляет собой двухступенчатый усилитель на сопротивле-

ниях, дополненный конденсатором обратной связи  $C_2$ . Благодаря конденсатору обратной связи напряжение с выхода усилителя вновь попадает на его вход, в результате чего в схеме возбуждаются колебания.

Механизм работы мультивибратора может быть объяснен следующим образом.

В момент включения мультивибратора колебания в нем отсутствуют. Если бы величины анодных напряжений и токов в схеме были строго постоянны, мультивибратор, как и обычный ламповый генератор, не смог бы возбудиться,

однако вследствие самопроизвольных флуктуаций тока в цепях мультивибратора в нем неизбежно должны возникнуть колебания.

Допустим, что вскоре после включения мультивибратора анодный ток одной из ламп, например  $L_1$ , получил мгновенное положительное приращение, обусловленное самопроизвольными флуктуациями. Вследствие увеличения анодного тока лампы  $L_1$  возрастает падение напряжения на ее анодной нагрузке  $R_1$ , и напряжение на аноде  $L_1$  падает. Умень-

шается также напряжение на конденсаторе  $C_1$ , который начинает разряжаться через лампу  $L_1$  и сопротивление  $R_4$ . Разрядный ток, протекая через сопротивление  $R_4$ , вызывает на нем падение напряжения, являющееся отрицательным смещением для лампы  $L_2$ . Отрицательное смещение на сетке лампы  $L_2$  уменьшает ее анодный ток и увеличивает напряжение на аноде. Одновременно увеличивается напряжение на конденсаторе  $C_2$ , который начинает подзарядаться через сопротивления  $R_2$  и  $R_3$ . Зарядный ток, протекая от положительного полюса анодной батареи к отрицательному, вызывает падение напряжения на сопротивлении  $R_3$ . Это падение напряжения служит положительным смещением для лампы  $L_1$ . Положительное смещение на сетке лампы  $L_1$  еще более увеличивает ее анодный ток.

Увеличение анодного тока лампы  $L_1$  и уменьшение анодного тока лампы  $L_2$  будут происходить до тех пор, пока в первой из них не будет достигнут ток насыщения или пока вторая не окажется запертой. В том и другом случаях анодный ток лампы  $L_1$  перестанет увеличиваться, а анодный ток

лампы  $L_2$  — уменьшаться. Как следствие, перестанут изменяться напряжения на анодах ламп, прекратится заряд или разряд конденсаторов, и сетки обеих ламп будут стремиться к нулевому потенциалу. Положительное смещение на сетке лампы  $L_1$  и отрицательное смещение на сетке лампы  $L_2$  начнут уменьшаться, что обусловит падение анодного тока первой лампы и рост анодного тока второй.

Процесс начинает повторяться в обратном порядке. Когда ток анода лампы  $L_2$  достигает насыщения или когда лампа  $L_1$  запирается, картина вновь изменяется. Ясно, что рассматриваемый процесс есть процесс периодический, и колебания анодного тока ламп мультивибратора будут происходить до тех пор, пока потери энергии в схеме не перестанут восполняться энергией источников питания.

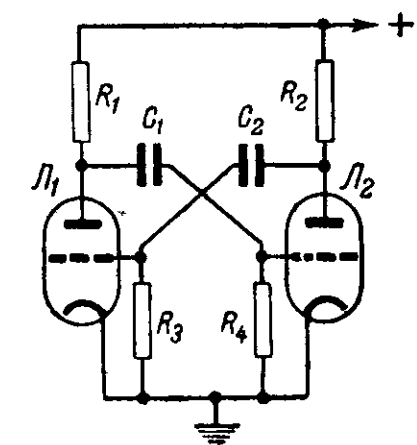
Связь мультивибратора с предыдущей и последовательной ступенями может быть как емкостной, так и индуктивной. В последнем случае катушки связи включаются в анодные или сеточные цепи ламп мультивибратора. Наиболее богаты гармониками сеточные токи, поэтому выходную катушку обычно включают последовательно с сопротивлением утечки сетки одной из ламп мультивибратора.

Настройка мультивибратора на желаемую частоту осуществляется подбором величин сопротивлений и емкостей в его цепях.

**Регенеративный приемник, звуковой генератор и гетеродинный волномер.** Указанные элементы, входящие в комплект эталона частоты, строятся по обычным схемам. Шкала звукового генератора проверяется и корректируется по сетке опорных точек, генерируемых мультивибратором на 1 000 гц.

**Синхронные часы.** Необходимой принадлежностью любого современного эталона частоты являются так называемые синхронные часы. С их помощью частота эталонного генератора сопоставляется с частотой абсолютного эталона, за который, как мы уже упоминали, принимается период вращения земного шара вокруг своей оси.

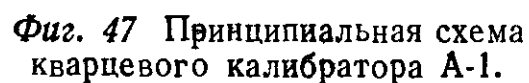
Основная деталь синхронных часов — синхронный электрический двигатель, питаемый от мультивибратора. В промышленных конструкциях стандартов частоты для питания синхронных часов применяется напряжение с частотой 1 000 гц. В любительских конструкциях синхронных часов может использоваться специальный синхронный электродвигатель, рассчитанный на питание от источника с частотой



Фиг. 46. Типовая схема мультивибратора.

Понижение или повышение частоты кварцевого генератора осуществляются с помощью переменной емкости или настроенного контура, подключенных к резонатору, как это было описано в гл. 2.

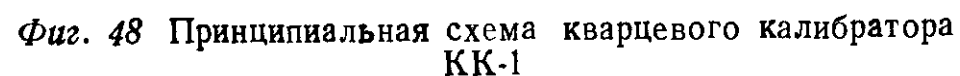
Для контроля градуировки радиопередающих и радиоприемных устройств в эксплуатационных условиях применяются простейшие генераторы с кварцевой стабилизацией, носящие название кварцевых калибраторов.



**Кварцевый калибратор А-1.** Принципиальная схема кварцевого калибратора А-1 показана на фиг. 47. Калибратор собран на лампе 6Ф5, укомплектован кварцами на 550, 1 000 и 4 700 кГц и генерирует опорные частоты в диапазоне от 500 до 43 000 кГц.

При проверке приемника кварцевый калибратор связывается с его входным контуром. Приемник ставится в режим

**Кварцевый калибратор КК-1.** Принципиальная схема кварцевого калибратора КК-1 дана на фиг. 48. Калибратор



Достоинством кварцевого калибратора КК-1 является достаточно большая густота опорных точек. При работе на частоте 100 кГц прибор генерирует не менее 100 ярко выраженных гармоник, а на частоте 1 мГц — не менее 20.

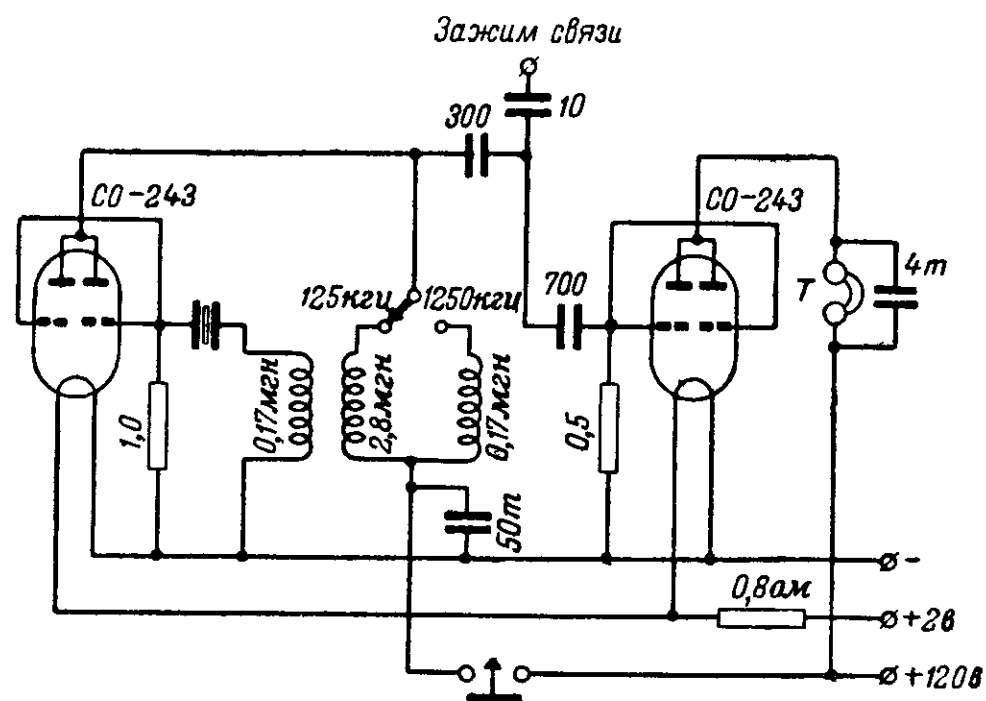
**Кварцевый калибратор КК-3.** По своей принципиальной схеме и конструктивному оформлению кварцевый калибратор КК-3 аналогичен прибору КК-1.



**Кварцевые калибраторы КК-4 и КК-5.** Принципиальная схема кварцевого калибратора КК-4 показана на фиг. 49. Основные частоты гетеродина — 125 и 1250 кГц. Прибор генерирует не менее 80 гармоник на частоте 125 кГц и не менее 16 на частоте 1250 кГц.

Кварцевый калибратор КК-5 отличается от предыдущего образца только типом ламп (6С5 вместо СО-243).

**Кварцевый коротковолновый мультивибратор ККМ-1.** Этот прибор представляет собой генератор с кварцевой ста-



Фиг. 49. Принципиальная схема кварцевого калибратора КК-4:

билизацией, собранный по так называемой динактронной схеме. Характерным для этой схемы является то, что в ней отсутствует цепь обратной связи и для генерирования колебаний используется динактронный эффект лампы. При наличии последнего генераторная лампа обладает «отрицательным» сопротивлением, компенсирующим потери в колебательной системе генератора.

Как известно, динактронный эффект в экранированной лампе возникает в том случае, когда напряжение на аноде лампы значительно меньше напряжения на ее экранированной сетке. При этом кривая зависимости анодного тока от напряжения на аноде имеет падающий участок, что и говорит о существовании «отрицательного» сопротивления (при повышении напряжения ток не возрастает, как обычно, а уменьшается).

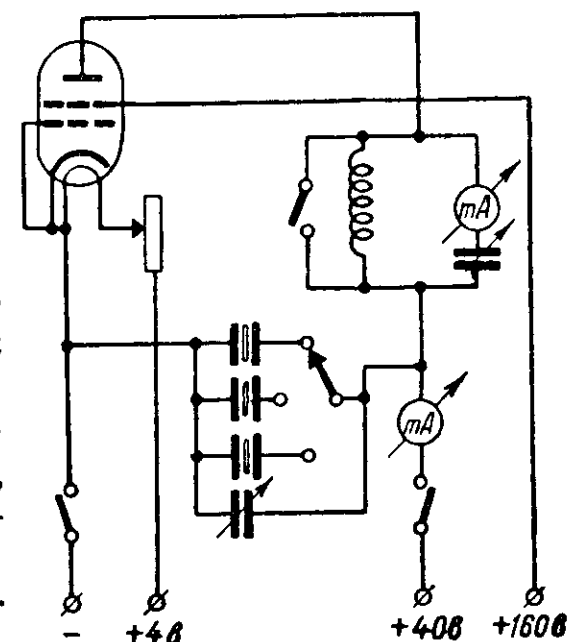
Принципиальная схема коротковолнового мультивибратора ККМ-1 представлена на фиг. 50. В комплект прибора входят кварцы трех частот: 500, 550 и 600 кГц, переключаемые посредством переключателя.

Прибор ККМ-1 генерирует большое число гармоник, создающих густую сетку опорных частот, причем опорные точки, создаваемые одним из кварцев, располагаются между опорными точками двух других резонаторов.

Для повышения стабильности генерируемых частот резонаторы помещены в термостат, рабочая температура которого поддерживается постоянной с точностью  $\pm 1^\circ \text{C}$ . Время нагрева термостата до рабочей температуры достигает двух часов, начиная с момента включения.

Коротковолновый кварцевый мультивибратор ККМ-1 предназначен для градуировки телеграфных приемников и волномеров. Для градуировки передатчика необходим вспомогательный приемник, так как в самом приборе ККМ-1 детектора не предусмотрено.

Описанные образцы промышленных конструкций кварцевых калибраторов весьма просты и легко могут быть изготовлены в любительских условиях. Их общий недостаток — отсутствие модуляции генерируемых колебаний звуковой частотой — можно устранить, питая аноды ламп пульсирующим постоянным или чистым переменным током, что позволит использовать эти приборы для настройки радиовещательных приемников, не рассчитанных на прием незатухающих колебаний.



Фиг. 50. Принципиальная схема коротковолнового кварцевого мультивибратора ККМ-1.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава первая. Кварцевый резонатор . . . . .</b>	<b>5</b>
Пьезоэлектрический эффект . . . . .	5
Общие сведения о пьезокварце . . . . .	6
Кварцевые резонаторы . . . . .	6
Виды колебаний кварцевых пластин . . . . .	10
Типы срезов кварцевых пластин . . . . .	11
Расчет кварцевых резонаторов . . . . .	13
Конструкции кварцедержателей . . . . .	13
Важнейшие параметры кварцевых резонаторов . . . . .	16
Краткие сведения о пьезокварцевом производстве . . . . .	19
Настройка кварцевых пластин в любительских условиях . . . . .	20
<b>Глава вторая. Генераторы с кварцевой стабилизацией . . . . .</b>	<b>23</b>
Режимы работы кварцевых генераторов . . . . .	23
Механизм работы осцилляторных схем кварцевых генераторов . . . . .	25
Стабильность частоты кварцевых генераторов . . . . .	26
Активность кварцевого резонатора при его работе в генераторных схемах . . . . .	28
Практические схемы генераторов с кварцевой стабилизацией . . . . .	29
Кварцевые генераторы с плавной настройкой . . . . .	36
Кварцевая стабилизация ультравысоких частот . . . . .	42
Конструирование кварцевых генераторов . . . . .	46
Налаживание кварцевых генераторов . . . . .	47
<b>Глава третья. Кварцевые фильтры . . . . .</b>	<b>49</b>
Общие сведения о фильтрах . . . . .	49
Кварцевые фильтры в любительской радиосвязи . . . . .	54
Работа кварцевого резонатора в полосовом фильтре . . . . .	55
Типы кварцевых фильтров . . . . .	56
Практические схемы кварцевых фильтров . . . . .	59
Конструирование кварцевых фильтров . . . . .	65
Налаживание кварцевых фильтров . . . . .	68
<b>Глава четвертая. Измерительная аппаратура . . . . .</b>	<b>76</b>
Измерение частоты кварца в любительских условиях . . . . .	76
Приборы для точного измерения частоты колебаний . . . . .	78
Образцовые генераторы и эталоны частоты . . . . .	83
Промышленные образцы кварцевых калибраторов . . . . .	92

Мне всегда нравились старые, сильно потрёпанные книжки. Потрёпанность книги говорит о её высокой востребованности, а старость о вечно ценном содержании. Всё сказанное в большей степени касается именно технической литературы. Только техническая литература содержит в себе ту великую и полезную информацию, которая не подвластна ни политическим веяниям, ни моде, ни настроениям! Только техническая литература требует от своего автора по истине великих усилий и знаний. Порой требуется опыт целой жизни, чтобы написать небольшую и внешне невзрачную книгу.

К сожалению ни что не вечно в этом мире, книги треплются, разваливаются на отдельные листы, которые затем рвутся в клочья и уходят в никуда. Плюс ко всему орды варваров, которым без разницы, что бросить в костёр или чем вытереть свой зад. Именно их мы можем благодарить за сожженные и растоптанные библиотеки.

Если у Вас есть старая книга или журнал, то не дайте им умереть, отсканируйте их и пришлите мне. Совместными усилиями мы можем создать по истине уникальное и ценное собрание старых технических книг и журналов.

Сайт старой технической литературы:

<http://retrolib.narod.ru>